

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Analýza sil řezání při frézování
z polotovaru po 3D tisku**

Analysis of Cutting Forces during Milling
from Semi-finished Product after 3D
printing

Student:

Bc. Martin Oulehla

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Oulehla

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Analýza sil řezání při frézování z polotovaru po 3D tisku
Analysis of Cutting Forces during Milling from Semi-finished Product
after 3D printing

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor působení sil při frézování.
2. Měření a analýza působení sil při frézování v návaznosti na vznik geometrické nepřesnosti obráběných vzorků.
3. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.

NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

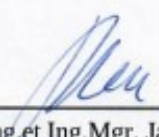
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Úřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Oulehla

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kopřivná 68

Poděkování:

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Marku Sadílkovi Ph.D. za příkladné vedení, veškeré odborné rady a připomínky poskytnuté v průběhu tvorby této práce. Současně bych chtěl poděkovat i za jeho pomoc při filtraci naměřených dat.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu mého studia morálně a finančně podporovali.

Diplomová práce byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

OULEHLA, M. *Analýza sil řezání při frézování z polotovaru po 3D tisku: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 69 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Předložená diplomová práce se zabývá analýzou sil řezání při frézování z polotovaru po 3D tisku. Řezné síly jsou jedny z nejzákladnějších a nejvýznamnějších parametrů při obrábění, které mají vliv na přesnost a kvalitu obrobenej plochy. V teoretické části je rozebrané působení sil během frézování, vlivy působící na velikost řezných sil a metody měření silových poměrů. Další část je věnována popisu korozivzdorné oceli 316L, které byla vytisknuta metodou LSM na 3D tiskárně. Dále popisu stroje, nástroje řezným podmínkám a zařízením pro měření sil. Experiment obrábění se týkal frézování vzorků s různou strukturou. Ve výpočetním programu se zpracovaly a vyhodnotily složky řezných sil F_x , F_y , F_z a výsledná síla F . Závěr diplomové práce se zabývá vyhodnocením a shrnutím experimentální zkoušky.

Klíčová slova: Frézování, 3D tisk, řezná síla, analýza řezných sil, 316L

ANNOTATION OF MASTER THESIS

OULEHLA, M. *Analysis of Cutting Forces during Milling from Semi – finished Product after 3D printing: Master Thesis*. Ostrava: VŠB -Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 69 p. Thesis head: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Presented diploma thesis is focused on analysis of cutting forces when machining semi-finished product after 3D printing. Cutting forces are one of the most basic and most important parameters of milling that have influence on accuracy and quality of milled surface. In the theoretical part is discussed the effect of forces during milling, influences affecting the size of cutting forces and methods of measurement of force ratios. Next part of thesis is dedicated to describing of stainless steel 316L, which was 3D printed by SLM method on 3D printer. After this focused on describing of machine, tool, cutting parameters and devices for measurement of these forces. Milling experiment was concerned on milling of samples with different structure. Components of cutting force F_x , F_y , F_z and resulting force F were processed and evaluated in computational program. End of thesis is focused on evaluating and summary of experimental test.

Key words: Milling, 3D printing, cutting force, analysis of cutting forces, 316L

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	- 9 -
Úvod	- 11 -
1. Teoretický rozbor působení sil při frézování	- 12 -
1.1 Měrná řezná síla	- 13 -
1.2 Řezné síly při válcovém frézování	- 15 -
1.3 Rozklad výsledné síly	- 16 -
1.4 Vlivy působící na velikost řezných sil	- 17 -
1.4.1 Vliv obráběného materiálu	- 17 -
1.4.2 Vliv posuvu	- 18 -
1.4.3 Vliv hloubky řezu	- 18 -
1.4.4 Vliv štíhlosti poměru řezání	- 19 -
1.4.5 Vliv úhlu čela	- 19 -
1.4.6 Vliv úhlu nastavení	- 19 -
1.4.7 Vliv řezné rychlosti	- 19 -
1.4.8 Vliv nástrojového materiálu	- 20 -
1.4.9 Vliv chladících a mazacích prostředků	- 20 -
1.4.10 Vliv opotřebení břitu řezného nástroje	- 20 -
1.5 Možnosti měření silových poměrů	- 21 -
1.5.1 Přímé měření sil a momentů	- 21 -
1.5.2 Nepřímé měření sil a momentů	- 25 -
1.6 Piezoelektrický jev	- 26 -
2. Provedení experimentálního testování	- 28 -
2.1 Popis experimentu	- 28 -
2.2 Návrh vzorků pro zkoušení	- 29 -
2.2.1 Výrobní zařízení Renishaw AM 400	- 29 -
2.2.2 Metoda tisku SLM	- 30 -
2.2.3 Ocel 316L	- 31 -
2.3 Obráběcí stroj	- 33 -
2.4 Obráběný nástroj	- 34 -
2.4.1 Upínač	- 34 -

2.5 Řezné podmínky	- 35 -
2.6 Zařízení pro měření sil při frézování	- 37 -
2.6.1 Dynamometr KISTLER 9129AA.....	- 37 -
2.6.2 Zesilovač 5070 A.....	- 38 -
2.6.3 DAQ Box Kistler 5697A1	- 39 -
2.6.4 DynoWare.....	- 39 -
2.7 Označování vzorků	- 41 -
3. Vyhodnocení experimentu	- 44 -
3.1 Predikce průhybu obrobku	- 47 -
3.2 Vyhodnocení silového zatížení při frézování	- 48 -
3.2.1 Vzorek No.0 % - 15.....	- 48 -
3.2.2 Vzorek No.1 - 2	- 50 -
3.2.3 Vzorek No.2 - 27	- 51 -
3.2.4 Vzorek No.100 % - 39.....	- 52 -
3.3 Porovnání vzorků.....	- 53 -
3.4 Zhodnocení a diskuze výsledků řezných sil	- 58 -
Závěr.....	- 59 -
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 61 -
SEZNAM PŘÍLOH	- 63 -

Seznam použitých symbolů a značek

ZNAČKA	NÁZEV	JEDNOTKA
a_p	hloubka řezu	[mm]
CAD	počítačem podporovaný návrh	-
CAM	počítačem podporovaná výroba	-
CNC	počítačem číslicově řízený stroj	-
D	průměr	[mm]
DC	řezný průměr	[mm]
DCON	spojovací průměr	[mm]
F	řezná síla	[N]
f	posuv	[mm]
F_c	hlavní složka řezné síly	[N]
F_{cN}	pasivní složka řezné síly	[N]
F_f	posuvová síla	[N]
F_{fN}	kolmá posuvová síla	[N]
F_v	výslednice sil	[N]
F_x	složka síly řezání ve směru x	[N]
F_y	složka síly řezání ve směru y	[N]
F_z	složka síly řezání ve směru z	[N]
HB	tvrdost dle Brinella	-
CHW	zkosení rohu	[mm]
k_{c11}	měrná řezná síla	[N·mm ⁻²]
KCH	sražení rohu	[°]
LF	funkční délka nástroje	[mm]
LU	maximální hloubka řezu nástroje	[mm]
m_c	materiálová konstanta	-
M_k	krouticí moment	[Nm]

N	otáčky	[min ⁻¹]
Pc	osobní počítač	-
R	řezná odpor	[N]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
RMS	efektivní hodnota vibrací	[N]
RMSF _x	hodnota RMS ve směru složky F _x	[N]
RMSF _y	hodnota RMS ve směru složky F _y	[N]
RMSF _z	hodnota RMS ve směru složky F _z	[N]
RO	rychlořezná ocel	-
SK	slinutý karbid	-
SLM	selektivní laserové tavení	-
v _c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v _f	rychlost posuvu	[mm·min ⁻¹]
z	počet zubu	-
χ _r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]

Úvod

Rozvoj a velký pokrok se v třískovém obrábění posouvá dopředu a zdokonaluje se. S tím také rostou veškeré nároky na výrobu součástí. V současné době patří frézování mezi nejdůležitější oblast obrábění. V době moderních CNC strojů a obráběcích center došlo k výraznému zrychlení procesu obrábění složitých tvarů. K těmto novým strojům podstatně patří CAD/CAM systémy, které zjednoduší a urychlí složitou činnost programování výroby součástí. Analýza sil tvoří důležitou oblast, která má vypovídat o průběhu řezného procesu, a přispívá tím k dosažení trvanlivosti řezných nástrojů, ale i strojního zařízení. Z těchto a mnoha dalších důvodů se analýza řezných sil stala klíčovou otázkou pro odborníky po celém světě.

Diplomová práce se zabývá analýzou řezných sil při frézování z polotovaru po 3D tisku. Řzná síla F je síla, kterou působí nástroj na obrobek. Řzné síly jsou jedny z nejzákladnějších a nejvýznamnějších parametrů při obrábění. Je to jev dynamický, který se v časovém sledu neustále mění. Řzné síly mají zásadní vliv na přesnost obrobku a kvalitu obrobené plochy. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řzný odpor R , který řzná síla musí při obrábění neustále překonávat.

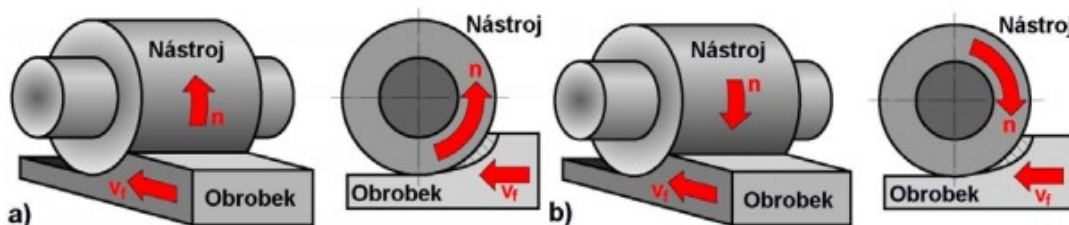
V teoretické části diplomové práce je provedený rozbor působení sil během frézování, řzné síly při válcovém frézování a popsány vlivy působící na velikost řzných sil. Dále se diplomová práce zaměřuje na metody měření silových poměrů.

Experimentální část se věnuje popisu korozivzdorné oceli 1.4404 (316L), která byla vytisknuta metodou SLM na zařízení Renishaw AM 400. Dále se věnuje popisu obráběcího centra DMG MORI DMU 50, řzného nástroje od firmy Sandvik Coromant a dynamometru Kistler 9129AA, který byl připojen k zesilovacímu zařízení Kistler 5070. Byla zvolena konstantní hloubka řezu, řzná rychlost a posuv za zub. Celý experiment se prováděl v laboratoři VŠB – TUO, Fakultě strojní, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie.

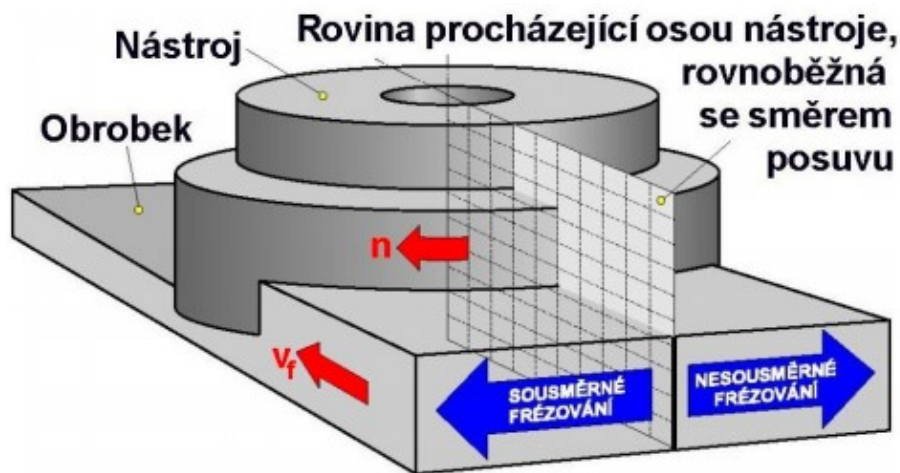
Cílem experimentální části je stanovit složky řzných sil F_x , F_y , F_z a výslednou sílu F na čtyřech vzorcích s různou strukturou. Od každé struktury byly měřeny dva vzorky. Následně byly porovnány hodnoty silových poměrů všech vzorků, aby bylo možné zjistit jaká struktura má vliv na obrábění. Tato práce by měla přispět k rozšíření znalosti řzných sil během frézování polotovaru po 3D tisku.

1. Teoretický rozbor působení sil při frézování

Frézování patří mezi velmi rozšířené metody v obrábění, při které je materiál odebrán břity rotujícího nástroje – frézou. Je možno obrábět jednoduché rovinné plochy, složité tvary, ale i rotační plochy. Při frézování koná hlavní pohyb nástroj (rotační). Vedlejší pohyb nejčastěji ve směru kolmém k ose nástroje vykonává obrobek (posuv). U moderních obráběcích strojů (víceosé CNC frézky, obráběcí centra) jsou posuvy plynulé měnitelné a mohou se realizovat ve více směrech zároveň. Řezný proces je přerušovaný, protože každý zub odřezává krátké třísky proměnlivé tloušťky. Z technologického hlediska se frézování dělí na čelní a válcové. Čelní frézování se používá při obrábění čelních fréz, které mají břity vytvořené na obvodě i na čele nástroje. Válcové frézování se nejčastěji používá při práci s válcovými nebo tvarovými frézami, kde zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje. V závislosti na kinematice se rozlišuje frézování sousledné (souměrné) nebo nesousledné (nesouměrné) [1,2].



Obrázek 1.1- Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [2]



Obrázek 1.2 - Čelní frézování [2]

Při tvorbě třísky mechanismus dokazuje, že v obráběném materiálu vzniká stav napjatosti důsledkem vnikání řezného klínu do materiálu. Při tomto procesu kromě plastické a elastické deformace se uplatňují i silové poměry.

Řezná síla je nejzákladnější a v mnoha případech nejdůležitější parametr v obráběcích procesech. Při frézování způsobují posunutí části nástroje, které mohou vést k nedodržení tolerance. Na břit řezného nástroje působí v procesu řezání odporové síly, které brzdí přesunu po dráze dané pracovním pohybem. Řezné síly jsou v rovnováze s ostatními silami řezání. Výslednici těchto sil nazýváme řeznou silou F . [8]

Nejčastější zdroje ovlivňující řezný pohyb: [8]

- odpor materiálu proti plastické deformace,
- odpor plastických deformací při přerušení lomu,
- odpor oddělené třísky v ohybu a lomu (lámání a stáčení třísky),
- síly tření na břitu.

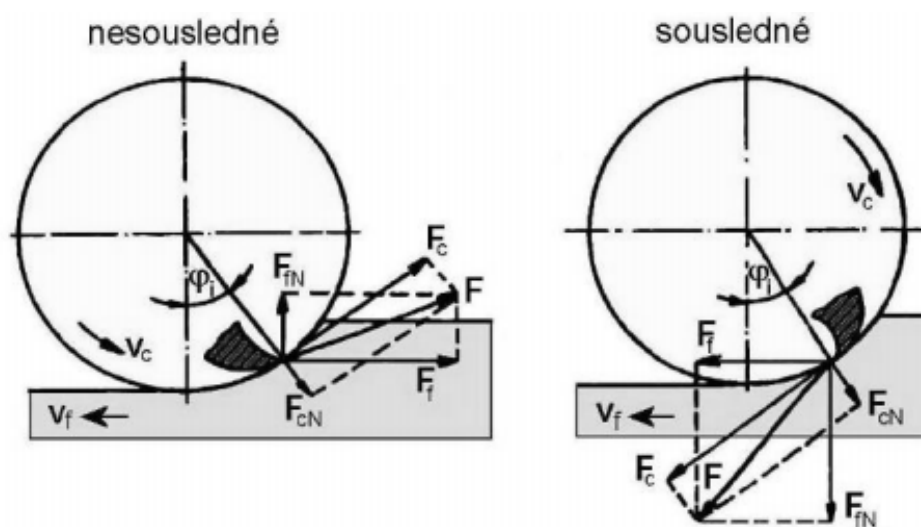
Síla řezání je jevem dynamickým. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor R , který síla řezání musí při řezném procesu neustále překonávat. Pro podmínku rovnováhy platí: [1,3]

$$F = -R \quad (1.1)$$

Kde,

F – síla obrábění [N],

R – řezný odpor [N].



Obrázek 1.3 - Schéma rozložení složek řezání při frézování [1]

F_c – řezná síla, F_{cN} – kolmá řezná síla, F_f – posuvová síla, F_{fN} – kolmá posuvová síla [1]

1.1 Měrná řezná síla

Stejně jako mechanika těles i nauka o materiálu definuje pevnost materiálu v tahu nebo tlaku, tak i teorie obrábění definuje velikost měrné síly potřebné k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. V základním tvaru je měrný řezný odpor popsán jako síla působící ve směru hlavního řezného pohybu. [4]

Vzorec pro výpočet řezné síly různých technologických operací vychází z Kinzelova matematického modelu.

Vztah pro výpočet řezné síly:

$$F_c = k_{c11} \cdot b \cdot h^{1-m_c} [N] \quad (1.2)$$

kde: k_{c11} – základní hodnota měrné řezné síly

b – šířka

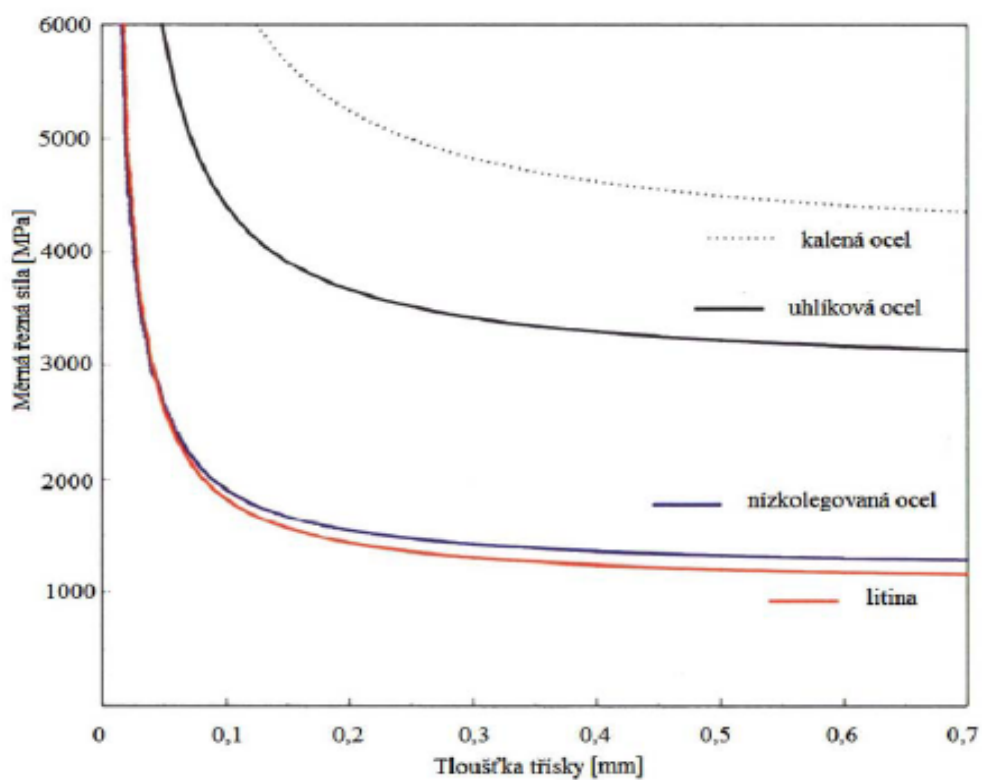
h – tloušťka třísky

m_c – konstanta

Matematický model měrné řezné síly:

$$k_c = k_{c11} \cdot h^{-m_c} [N \cdot mm^{-2}] \quad (1.3)$$

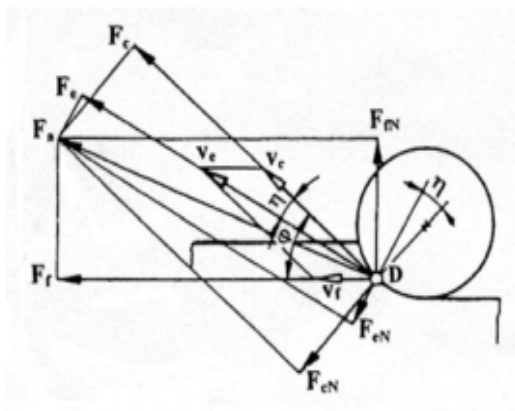
kde: k_c – měrná řezná síla



Obrázek 1.4 - Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [5]

1.2 Řezné síly při válcovém frézování

Při určení řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v určité poloze φ_i .



D– hlavní bod ostří;
F_a– aktivní síla;
F_c– řezná síla;
F_e– pracovní síla;
F_{eN}– kolmá pracovní síla;
F_f– posuvová síla;
F_{fN}– kolmá síla posuvu;
φ - úhel posuvového pohybu;
η - úhel řezného pohybu

Obrázek 1.5 - Rozklad celkové řezné síly na zubu nástroje při rovinném frézování válcovou frézou s přímými zuby [19]

Málokdy je při válcovém frézování v záběru jen jeden zub. Obvykle se do záběru dostávají minimálně dva. Počet zubů v záběru se značí – n_z

V případě válcového frézování nástrojem s přímými zuby je celková řezná síla na zubu označována jako **F_i** – Ta se dále rozkládá na složky **F_{ci}** a **F_{cNi}**, resp. na složky **F_{fi}** a **F_{fNi}**

F_{cNi} – kolmá řezná síla, **F_{ci}** – řezná síla, **F_i** – celková řezná síla;

F_{fNi} – kolmá posuvová síla, **F_{fi}** – posuvová síla;

F_{ci} – Řezná síla se vyjadřuje na základě průřezu třísky **A_{Di}** a měrné řezné síly **k_{ci}**:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin(\varphi_i) [N], \quad (1.4)$$

K_{ci} – Měrná řezná síla vyjádřena:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (1.5)$$

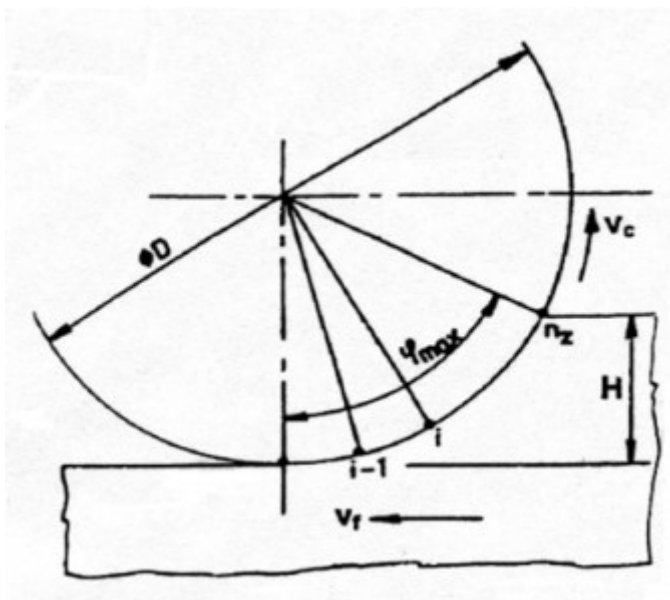
Tuto rovnici lze dosadit do předchozího vzorce. Vznikne:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i [N]. \quad (1.6)$$

Frézy jsou nejčastěji vícebřité nástroje, při frézování je vždy v záběru několik zubů současně. Výsledná síla **F_c** se vypočítá ze vztahu: [2]

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i [N] \quad (1.7)$$

V tomto vztahu je *i* vyjádřením polohy v současném záběru. Platím že $i < 1, n_z >$. Hodnota proměnné n_z je určena na základě obr 1.6.



Obrázek 1.6 - Počet zubů v záběru při válcovém frézování [19]

z – počet zubů frézy.

$$n_z = \frac{\varphi_{\max}}{360} \cdot z \quad (1.8)$$

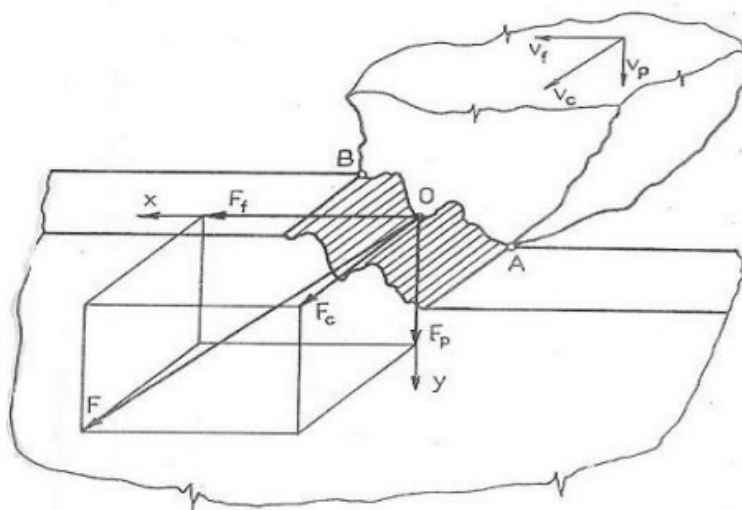
1.3 Rozklad výsledné síly

V běžném případě má vektor výsledné síly F různou velikost, směr a smysl. Pro usnadnění výpočtu pak můžeme výslednou řeznou sílu $F[N]$ promítnout na osu x , y , z .

Výsledná síla F může být promítnutá na osu x , y , z . Průmět na osu x se nazývá axiální. Posuvová složka řezné síly se označuje F_f . Tato složka se rovná součtu síly odporu obráběného materiálu proti vřezání nože ve směru sil tření a posuvu, působící ve směru. Slouží k výpočtu mechanismu stroje a ložisek vřetene.

Průmět síly do osy y se nazývá radiální a označuje se F_p . Způsobuje průhyb, který je příčinou snížení přesnosti a může vyvolat nežádoucí vibrace.

Průmět síly do osy z se nazývá tangenciální (hlavní) složka řezné síly F_c . [8]



Obrázek 1.7 - Rozklad řezných sil v ortogonálním souřadnicovém systému [8]

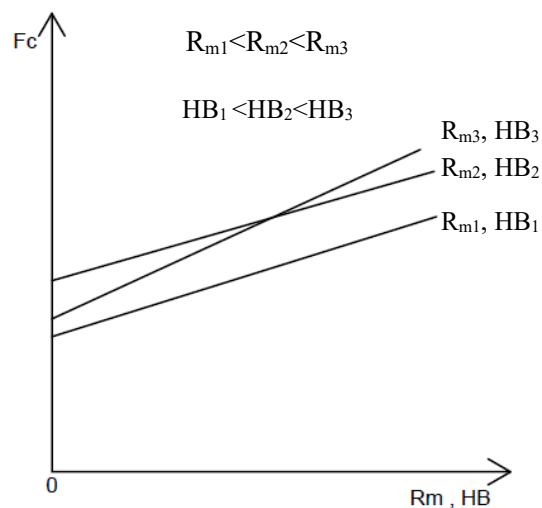
1.4 Vlivy působící na velikost řezných sil

Velikost řezné síly F_c je nejčastěji závislá na obráběném materiálu a řezných podmínkách. Z pevnostního hlediska je zatížen obrobek i nástroj. Síla, která působí na ně musí být eliminována v upínacím ústrojí nástroje a obrobku a přejata tak do stroje. V praxi nejčastěji sílu ovlivňuje 10 veličin, které jsou zahrnuty do výpočtu řezných sil. [8]

1.4.1 Vliv obráběného materiálu

Při obrábění odlišných druhů materiálu, při konstantních podmínkách budou vyvolány rozdílné řezné síly. Za nejčastější příčinu se považují různé chemické a fyzikální vlastnosti těchto materiálu. Nárůst řezné síly může mít za důsledek rostoucí pevnost v tahu nebo tvrdosti. Další řada ovlivňujících faktorů může být legující přísady, struktura atd., které na sílu řezání mají vliv. [8]

Novější práce ukazují, že pevnost v tahu daného materiálu není důležitým faktorem pro řeznou sílu. Plyne to ze skutečnosti, že zkoumané materiály měly $R_m = 400$ až 1400 MPa, a maximální rozdíl řezné síly byl ± 15 až 20 %. [8]

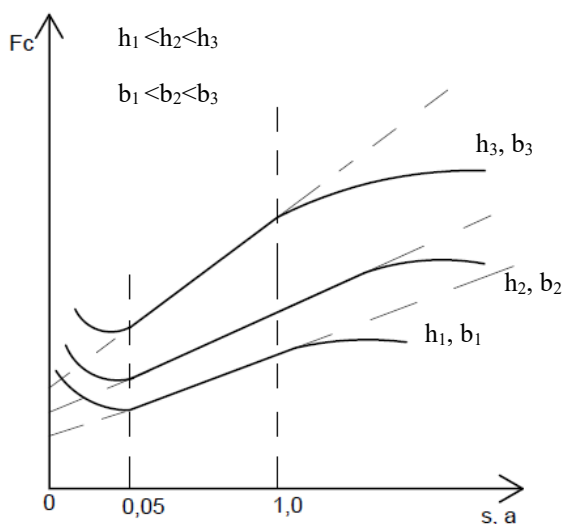


Obrázek 1.8 - Vliv obráběného materiálu [8]

1.4.2 Vliv posuvu

Posuv s , nebo tloušťka řezu a patří k veličinám, které mají určitý vliv na řeznou sílu. Při vyšších posuvech (přibližně od $s = 1$ mm/ot) se lineární průběh řezné síly odklání od daného směru. Je nutno upozornit, že křivky neprocházejí počátkem souřadnic, ale ordinátou v určité výšce. [8]

Průběh křivek v grafu $F_c = f(s, a)$ je velmi silně idealizován, neboť při velmi malých posuvech případně tloušťkách řezu nastává v závislosti na materiálu obrobku přibližně $a \approx 0,05$ mm vzestup řezné síly jako důsledek narůstajícího vlivu zaoblení ostří. [8]



Obrázek 1.9 - Vliv posuvu [8]

1.4.3 Vliv hloubky řezu

Průběh $F_c' = f(h)$, lze charakterizovat: při vzrůstající hloubce odřezávané vrstvy h stoupá řezná síla F_c rovnoměrně. V souřadném systému představuje přímku, která prochází počátkem. Přímky stoupají strměji nebo pozvolněji, podle zvoleného posuvu. [8]

1.4.4 Vliv štiřlosti poměru řezání

Pojem štiřlost řezu je podíl hloubky řezu h a posuv s . Tento pojem lze vyjádřit tak, že malá hodnota G je vhodnější z hlediska řezných sil. Nejmenší řezná síla se dosahuje při čtvercovém průřezu, tj $G = 1$. Velký poměr naopak přináší zvýšení trvanlivosti nástroje. [8]

$$G = \frac{h}{s} \quad (1.9)$$

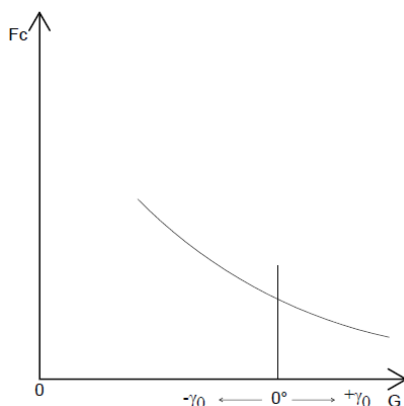
kde: G – štiřlostní poměr

h – hloubka řezu

s – posuv

1.4.5 Vliv úhlu čela

Řezná síla roste, klesá-li úhel čela γ_0 až do záporných hodnot. Jestliže roste v kladných hodnotách, může se to projevit poklesem řezné síly. Řezná síla se mění s každým jedním stupněm γ_0 o 1 % pro ocel a ocel na odlitky. Tyto poznatky se vztahují na γ_0 (úhel čela) v intervalu -20 až $+30$. [8]



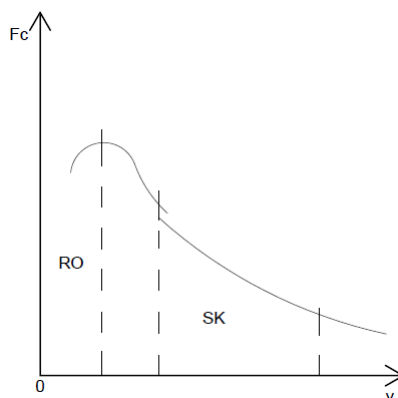
Obrázek 1.10 - Vliv úhlu čela [8]

1.4.6 Vliv úhlu nastavení

Řeznou sílu F_c úhel nastavení ovlivňuje poměrně málo. Pro vázané obrábění, velmi častého v praxi, je minimum F_c při $\chi_r = 60^\circ$. Při volném řezání už řezná síla se vzrůstajícím úhlem nastavení nad 60° zůstává konstantní. [8]

1.4.7 Vliv řezné rychlosti

V dřívějších úvahách se usoudilo že řezná rychlost nemá vliv na řezné síly. Nové výzkumy nás přesvědčují, že opak je pravdou. V rozsahu od 100 až 600 m.min⁻¹, se tvoří plynulá tříska, řezná síla s rostoucí rychlostí klesá. Řezná síla při poklesu řezné rychlosti ze 100 m.min⁻¹ na rychlost 20 m.min⁻¹ silně narůstá. [8]



Obrázek 1.11 - Vliv řezné rychlosti [8]

1.4.8 Vliv nástrojového materiálu

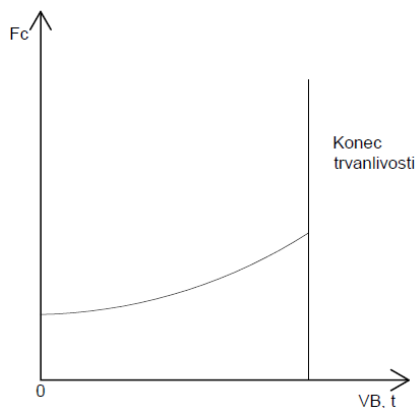
Řezné síly poklesnou o 5 až 10 % při použití keramických břitových destiček oproti obrábění nástrojem ze SK. Při aplikaci rychlořezné oceli jako nástrojového materiálu vzroste síla o 5 % za shodných řezných podmínek. Nejhlavnějším důvodem je změna koeficientu tření mezi třískou a čelem nástroje, hřbetem a obrobenou plochou. [8]

1.4.9 Vliv chladících a mazacích prostředků

Řezná síla ve srovnání s obráběním za sucha může být výrazně snížena při použití mazacích a chladících kapalin. Vlastnosti a složení kapalin hraje při tomto výraznou roli. Lze počítat až 15% poklesu řezné síly oproti obrábění za sucha. Zejména u RO lze počítat s takovou úvahou. U slinutého karbidu řezné keramiky ne, protože se aplikují bez chlazení vzhledem k jejich náchylnosti k porušování křehkým lomem. [8]

1.4.10 Vliv opotřebení břitu řezného nástroje

Při obrábění dochází k opotřebení řezného nástroje v místech styku s třískou a obrobenou plochou. Vzniká tak na čele výmol a na hřbetě opotřeбенé plochy. Jejich rozměry se zvětšují, když je nástroj v záběru. Zvětšení řezné síly se projeví při nárůstu opotřebení. Výrazný vliv má opotřebení na hřbetu, kde se může řezná síla zvýšit o 30 až 50 %. [8]



Obrázek 1.12 - Nárůst opotřebení [8]

1.5 Možnosti měření silových poměrů

Měření silového zatížení je možné rozdělit na metody přímé a nepřímé. Přímá metoda měření se realizuje pomocí piezoelektrických dynamometrů, nebo tenzometrické měřicí sestavy. Nepřímá metoda je realizována na měření rozdílu mezi výkonem stroje a příkonem.[6]

1.5.1 Přímé měření sil a momentů

Při přímém měření složek síly řezání a točivých momentů se zakládá na měření deformací v soustavě S-N-O během procesu obrábění prostřednictvím dynamometrů. Dynamometr je měřicí přístroj, který musí zajistit měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Poté se musí měřit sledovaná veličina v určitém zvoleném rozsahu s maximální přesností a zaručit stálost naměřených hodnot s časem. Základní podmínky kladené na dynamometr:[1]

- vysoká tuhost dynamometrů,
- dostatečná tuhost dynamometrů,
- stálost údajů dynamometrů,
- konstrukce dynamometrů musí zajistit, aby se složky řezných sil vzájemně neovlivňovaly.

Podle počtu měřených složek sil	<ul style="list-style-type: none">• jednosložkové,• dvousložkové,• třísložkové.
Podle počtu aplikované měřicí metody	<ul style="list-style-type: none">• mechanické,• hydraulické,• pneumatické• elektrické.
Podle metody obrábění	<ul style="list-style-type: none">• soustružení,• frézování,• vrtání,• broušení.

Obrázek 23 - Základní rozdělení dynamometrů [1]

Mechanické dynamometry

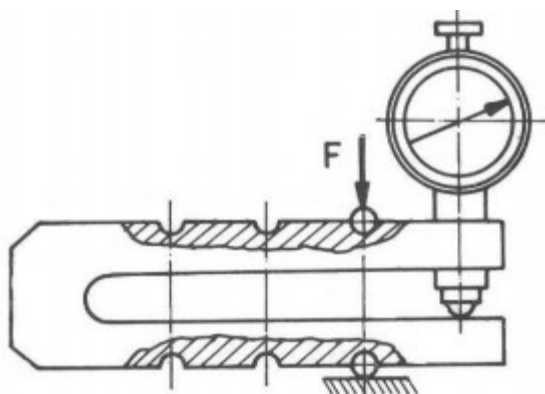
U mechanických dynamometrů se síly transformují přímo nebo znásobené mechanickým převodem na měřicí prvek. Velikosti síly se vykazuje z deformace silových pružin, třmenů, kroužků, membrán, nosníků, popřípadě podle hloubky vtlačení kuličky do materiálu o známé tvrdosti. Mechanické dynamometry mohou být třmenové do zatížení 10 000 N nebo dynamometry kruhové, popřípadě prstencové pro ještě větší zatížení. [1]

Výhody:

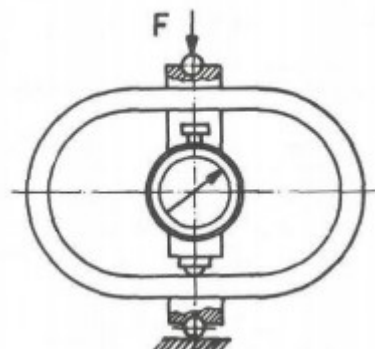
- Jednoduché, spolehlivé,
- vysoká přesnost v rozmezí 0,5 – 2 %.

Nevýhody:

- Závislost údajů na čase,
- velká únava materiálu a setrvačnost systému,
- nutnost vymezování vůlí.



Obrázek 1.14 - Mechanický dynamometr třmenový [1]



Obrázek 1.15 - Mechanický dynamometr prstencový [1]

Hydraulický dynamometry

Přenos účinku měřicí síly nebo momentu na píst nebo membránu hydraulického obvodu. Pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině, která je snímána pomocí manometru, nebo jiným přístrojem. V současné době se využívají pouze výjimečně. [1]

Výhody:

- Jednoduchá konstrukce,
- snadné měření více složek současně.

Nevýhody:

- Nízká citlivost,
- Vysoké požadavky na dokonalé utěsnění a velká setrvačnost.

Pneumatické dynamometry

Jsou založeny na měření změny tlaku nebo průtoku v závislosti na změně výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu. Snadná obsluha a údržba, vysoká citlivost a spolehlivost a nízké pořizovací náklady. [1]

Elektrické dynamometry

Jsou to nejrozšířenější a nejpoužívanější zařízení v technické praxi, které disponují řadou výhod:[1]

- Snadný přenos dálkového signálu s řadou možných úprav,
- Možnost snímání signálu při pohybujících a rotujících součástech,
- Využití miniaturních měřících elementů,
- Snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu.

Elektrické odporové dynamometry využívají pro měření velikosti deformace změnu odporu snímačů. Nejpoužívanějším odporovým snímačem jsou tenzometry. Změna odporu je způsobená deformací vodiče nebo polovodiče. Při deformaci dochází ke změně délky a průřezu vodiče, ale i ke změně měrného odporu materiálu vodiče. Nejpoužívanějším materiálem u kovových tenzometru je slitina Cu – Ni. Dle technologie výroby se dělí kokové tenzometry na drátkové, fóliové a napařované.

Drátkové tenzometry mají měřicí mřížku z drátu o průměru 0,01 – 0,05 mm nalepenou na tenkou izolační podložku z pryskyřice nebo papíru. Měřicí mřížka má tvar spirály. Mají malý rozptyl hodnot odporu, součinitele deformační citlivosti i teplotních součinitelů. Z těchto důvodů jsou nejrozšířenější pro měření sil.

Fóliové tenzometry se od drátkových liší technologií výroby. Fóliové tenzometry se vyznačují dokonalejším spojením měřicí mřížky. Měřicí mřížka je vyrobena z tenké fólie o tloušťce 0,012 – 0,0015 mm. Jsou přesnější a stabilnější než tenzometry drátkové.

Napařovací tenzometry představují další vyšší vývojový stupeň. Podstatou je postupné napařování jednotlivých vrstev přímo na měřené místo deformačního elementu. Umožňují vyrobit snímač malých rozměrů a tlouštěk.

Dvousložkový elektrický dynamometr pro soustružení je konstruován jako držák soustružnického nástroje, který je ustavený na dva stejné nosníky. Tento dynamometr lze použít pro měření rezných složek F_c a F_p . Na dynamometru nejsou žádné pohyblivé

části a tuhost měrných článků je v místech snižena tak, aby byla zajištěna při maximální citlivosti co největší tuhost.

Dvousložkový elektrický dynamometr pro vrtání je jeden nosník, na konci upevněný v základové desce. Uprostřed je nosník upraven tak, aby bylo možné vrtaný materiál upnout. Tenzometry jsou nalepeny pro snímání sil i kroutících momentů.

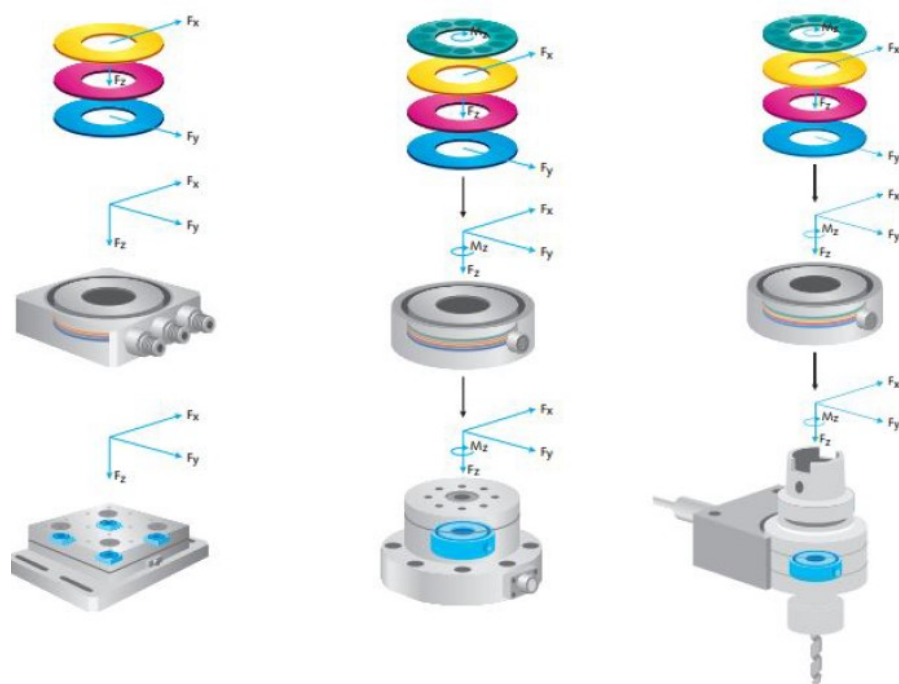
Třísložkové dynamometry se skládají z pláště o vysoké tuhosti, z tělesa držáku a měřících článků jejichž součástí jsou tenzometrické snímače. Tento dynamometr je opatřen pevným krytem proti vniknutí třísek k snímacím článkům. Zpravidla tento dynamometr používá 8 snímacích článků. Těleso nožového držáku je uloženo na snímacích člancích, které obsahují deformační tělíska s nalepenými tenzory. [1]

Univerzální dynamometr je stejně jako dynamometry předchozí řešen bez pohyblivých částí, a to monolitickým celkem základové desky s bočními stěnami opatřenými odnímatelnými kryty. Jeho tvary a rozměry umožňují upnutí jak soustružnického nože, tak přípravku pro univerzální použití na dalších obráběcích strojích. Tento dynamometr je určen pro snímání složek řezání F_c , F_f , F_p , i kroutícího momentu. Univerzální dynamometr lze použít pro měření sil při soustružení, frézování, vrtání, broušení apod. do uvedených hodnot: [1]

složka F_c	do	5900 N,
složka F_p	do	9500 N,
složka F_f	do	2000 N,
M_k	do	620 Nm.

Piezelektrické dynamometry:

Využívá se pro snímání deformace piezelektrického jevu, který využívá schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci. Mezi nejužívanější piezelektrické materiály patří křemen, materiály na bázi titaničitanu barnatého nebo Seignettovy soli. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až vymizí. V současné době jsou k dispozici moderní piezelektrické dynamometry značky KISTLER, které jsou speciálně konstruované pro potřeby obrábění. [1]



Obrázek 1.16 - Typy piezoelektrických dynamometrů pro měření sil a momentů při různých aplikacích [7]

Tabulka 1.1 - Porovnání vlastností jednotlivých dynamometrů

metoda měření	zkreslení	rozměry	rozsah	přesnost	poruchovost	setrvačnost	cejchování	spolehlivost	náklady	obsluha
piezoelektrická	+	+	+	+	0	++	-	--	--	--
kapacitní	+	-	+	+	0	++	+	0	--	--
uhlíkového odporu	+	+	+	+	0	++	0	-0	+	++
kapalinového odporu	+	+	+	0	0	0	0	0-	+	+
indukční	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
magnetická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
tenzometrická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	++

+ výhodná charakteristika, 0 středně výhodná charakteristika, - nevýhodná charakteristika

1.5.2 Nepřímé měření sil a momentů

Nepřímé měření sil vychází převážně z výkonu elektromotoru obráběného stroje. Ze vztahu pro užitečný výkon při obrábění plyne, při nepřímém měření lze z výkonu hnací jednotky stanovit pouze tangenciální složku síly řezání. [1]

$$P_{u\dot{z}} = F_c \cdot v_c \quad (1.10)$$

kde: $P_{u\dot{z}}$ [W] – užitkový výkon stroje,
 F_c [N] – tangenciální složka síly obrábění,
 v_c [m·s⁻¹] – řezná rychlost obrábění.

Ke stanovení tangenciální složky síly obrábění se vychází z užitečného výkonu, který je potřeba k vlastnímu obrábění. Nejprve se musí změřit výkon nezatíženého obráběcího stroje, tj. výkon naprázdno, poté se změří celkový výkon obráběcího stroje při obrábění. Pro užitkový výkon platí: [1]

$$P_{u\dot{z}} = P_c - P_o \quad (1.11)$$

kde: P_c [W] – celkový výkon obráběného stroje,
 P_o [W] – výkon při chodu naprázdno.

Stanovení tangenciální složky řezání se využívá při vrtání. Tento princip vychází z měření celkového výkonu pomocí přesného univerzálního zapisovacího přístroje. Podmínka rovnováhy točivého momentu od tangenciální složky řezné síly a kroutícího momentu zní: [1]

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (1.12)$$

kde: M_k [N·m] - točivý moment od tangenciální složky síly obrábění
 D [mm] - průměr nástroje nebo obrobku
 M_{kb} [N·m] - točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou

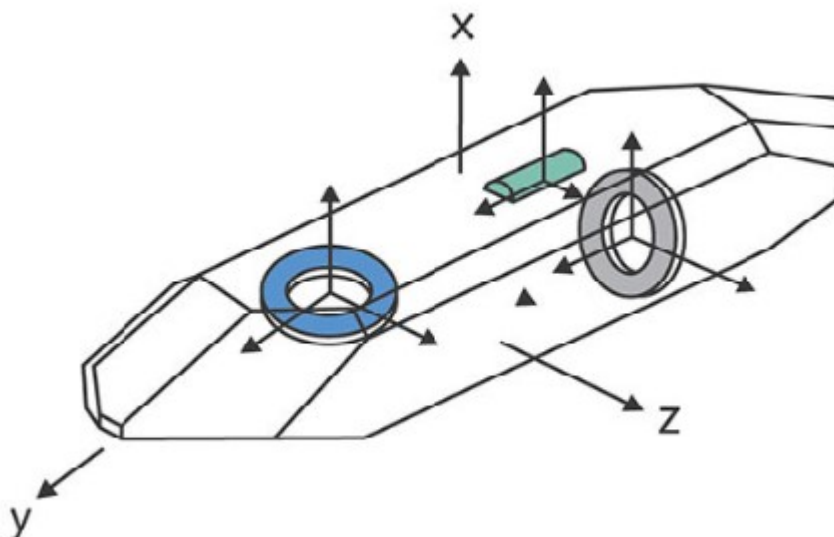
Tato metoda se používá velmi málo. Při aplikaci nepřímé metody stanovení tangenciální složky síly obrábění z točivého momentu nejsou ovlivňovány rozdílnou účinností obráběcího stroje při zatížení a chodu naprázdno. Jsou ovlivňovány součinitelem tření na brzdě. [1]

1.6 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický efekt je odvozen od řeckého „piezeinu“ což znamená stlačení pevných látek generovat elektrický náboj v reakci na mechanické napětí. Použitá síla způsobí změnu mikroskopické struktury objektu, což má za následek dipóly, mezi nimiž je generováno elektrické pole. Piezoelektrický efekt je reverzibilní, což znamená,

že piezoelektrické materiály podléhají elastické deformaci při aplikaci elektrického pole. Jedním z nejdůležitějších materiálu je křemen SiO_2 .

Na rozdíl od mnoha jiných materiálu není křemen pyroelektrický, a proto je odolný proti kolísání teploty. Piezoelektrický efekt se používá v různých oblastech. Nejčastěji průmyslové procesy, jako je výroba automobilů a vstřikování plastů. [23]



Obrázek 1.17 - Orientace krystalových os u křemene [23]

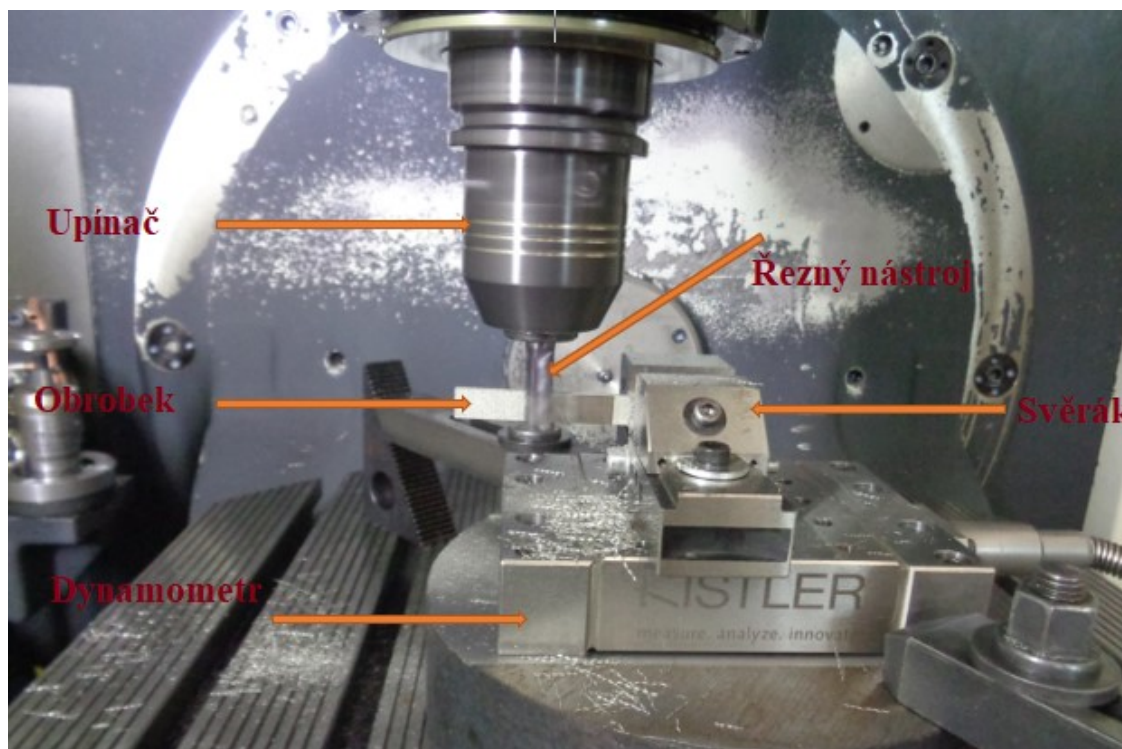
2. Provedení experimentálního testování

2.1 Popis experimentu

Praktická část diplomové práce se zabývá analýzou sil řezání při frézování z polotovaru po 3D tisku. Pro frézování byla zvolena korozi-vzdorná ocel 1.4404 (ASIS 316), která byla vytisknuta metodou SLM na zařízení Renishaw AM 400. Ocel je kyselinovzdorná s nízkým obsahem uhlíku. Celý experiment se prováděl na VŠB – TUO, Katedře obrábění, montáže a strojírenské technologie. Samotný experiment byl proveden na pěti-osém frézovacím centru DMG MORI DMU 50. Jako nástroj byla zvolena monolitní fréza s označením 1P341-1000-XA 16300 od firmy Sandvik Coromant.

Před začátkem měření byl upnut dynamometr Kistler 9129 AA na otočný stůl frézovacího centra DMG MORI DMU 50, poté byl zapojen do zesilovače Kistler 5070. Zesilovací zařízení bylo propojeno s přenosným počítačem, ve kterém byl nahrán software DynoWare pro vyhodnocení řezných sil. Ocel byla upnuta do svěráku, který byl upevněn na dynamometru. Zachycený moment záběru během experimentu na obrázku 2.1. Frézování probíhalo souslednou metodou za sucha při konstantní řezné rychlosti $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a konstantní hloubce řezu $0,2 \text{ mm}$.

Cílem experimentální činnosti je stanovit složky řezné síly F_x , F_y , F_z na čtyřech vzorcích s různou strukturou. Od každé struktury byly měřeny dva vzorky. Celkem se tedy provedlo 8 testů. Vzorky, na kterých se provádělo měření řezných sil mají všechny stejné rozměry a jsou ze stejných materiálů. Dále se provedlo porovnání RMS hodnot, rozptýl jednotlivých složek sil a vygenerovaná výslednice sil.



Obrázek 2.1 - Moment záběru během frézování s popisky

2.2 Návrh vzorků pro zkoušení

Pro praktickou část byla zvolena ocel 316L. Ocel byla ve formě prášku vytisknutá metodou SLM (Selektivní laserové tavení). K tisku vzorků nám posloužilo zařízení od firmy Renishaw, které se nachází v laboratoři Aditivní výroby na fakultě strojní Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Jedná se o typ Renishaw AM 400.

2.2.1 Výrobní zařízení Renishaw AM 400

Toto zařízení je nejnovější vývoj platformy Renishaw AM 250, které disponovalo laserem o výkonu 200 W. Je vybaveno nejnovějšími aktualizacemi systému, včetně většího filtru SafeChange a vylepšeného softwaru pro optickou kontrolu. [9]



Obrázek 2.2 - Zařízení Renishaw AM 400 [9]

Renishaw AM 400 má externí násypku s ventilem, který umožní přidání dalšího materiálu během procesu. Násypku je možno vyjmout nebo vyměnit za sekundární. Nádoby na přetékání prášku jsou mimo komoru a mají uzavírací ventily. Zásobník je demontovatelný, což zjednodušuje čištění. Výhodou toho zařízení je rychlá a efektivní výměna materiálu a nízká spotřeba argonu. Přehled základních parametrů lze vidět v následující tabulce 2.1. [9]

Tabulka 2.1 - Technické parametry Renishaw AM 400 [10]

Technické parametry Renishaw AM 400		
Rozměry pracovního prostoru (X, Y, Z)	250,25,300	mm
Rychlost výroby (dle materiálu, hustotě, tvaru)	5 – 20	Cm ³ /hod
Rychlost snímání	Až 2000	mm/s
Rychlost polohování	7000	mm/s
Tloušťka vrstvy	20 – 100	μm
Výkon laseru	400	W

Na zařízení Renishaw AM 400 lze tisknout korozivzdorné oceli (316L, 174PH), nástrojovou ocel (H13), také vysoce kvalitní kovy Ti6Al4V ELI, AlSi10Mg, slitiny niklu, slitiny kobaltu a chromu. [9]

2.2.2 Metoda tisku SLM

Vzorky pro praktickou část byly vytisknuty na 3D tiskárně metodou SLM (Selective Laser Melting). Při selektivním laserovém tavení se materiál nanáší v práškové formě v tenké vrstvě na základní desku. Práškový materiál je lokálně zcela přetavován laserovým zářením a po ztuhnutí tvoří pevnou vrstvu. Následně se základní deska sníží o množství tloušťky vrstvy a znovu se nanese prášek. Tento cyklus se opakuje, dokud nejsou všechny vrstvy přetaveny. Hotový výrobek je očištěn od přebytečného prášku. [16]



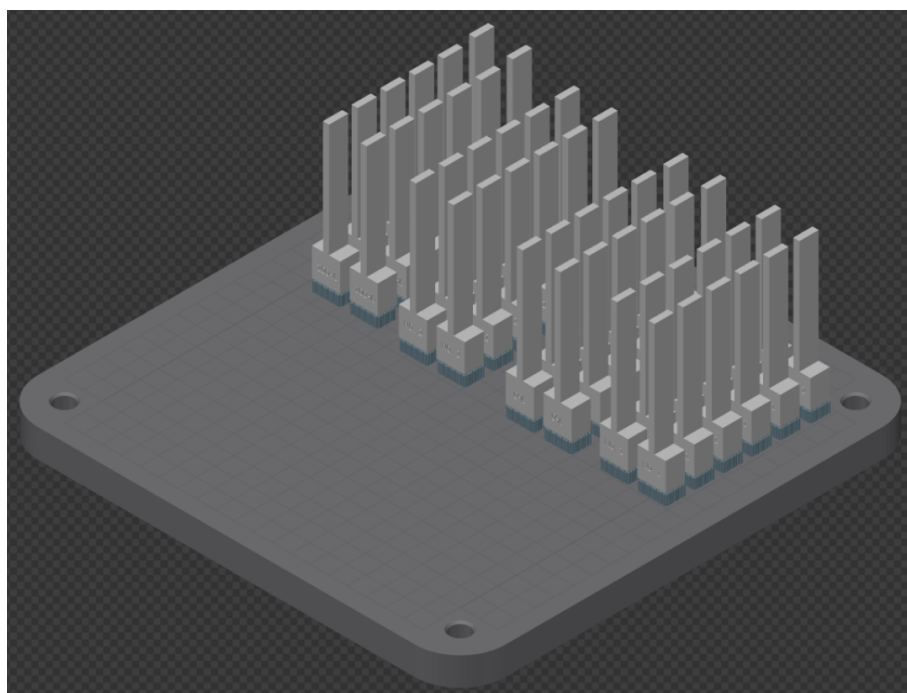
Obrázek 2.3 - Schématické znázornění metody SLM [15]

Doba výroby všech vzorků rozložených na základní desce trvala 51 hodin a 15 min. Což potvrzuje jednu z hlavních nevýhod 3D tisku, příliš dlouhá doba výrobního procesu. Za tuto dobu bylo nanášeno 1621 vrstev práškového materiálu. To při tloušťce vrstvy

50 μm znamená, že celková výška stavby i s podpěrami se rovná 81.05 mm. Následující tabulka 2.2 zobrazuje obecné parametry tisku.

Tabulka 2.2 - Shrnutí celkové výroby

Základní výrobní informace		
<i>Celková doba výroby</i>	3 075	min
<i>Výkon laseru</i>	200	W
<i>Rychlost</i>	650	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>Tloušťka vrstvy</i>	50	μm
<i>Celková výška stavby</i>	81,1	mm
<i>Celkový počet vrstev</i>	1621	-
<i>Celkový objem dílu</i>	169 572	mm^3
<i>Celkový objem podpor</i>	21 976	mm^3
<i>Počet vzorků</i>	48	ks
<i>Strategie</i>	Meander	



Obrázek 2.4 - Ukázka vzorků na základní desce

2.2.3 Ocel 316L

K výrobě zkušebních vzorků pro experimentální část diplomové práce byl použit prášek nerezové oceli 316L. Materiál je dodaný přímo od výrobce stroje.

Ocel je vysoce odolná proti všem typům koroze i proti koncentrovaným kyselinám. Materiál 316L je velmi dobře svařitelný a leštitelný. Ocel je dobře svařitelná bez rizika

mezikrystalové koroze v oblasti tepelného ovlivnění. Vhodná také k tváření za studena. Vyznačují se velice dobrými mechanickými vlastnostmi. [11]

Tato korozivzdorná ocel se často používá v chemickém průmyslu s vysokým chemickým namáháním, v zařízeních pro styk s mořskou vodou, nebo pro výrobu bazénových doplňků. V následujících tabulkách jsou uvedeny fyzikální, chemické vlastnosti a mechanické vlastnosti po tepelném zpracování. [11]

Tabulka 2.3 - Fyzikální vlastnosti oceli 316L [12]

Hustota	7,99	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná vodivost	16,2	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Bod tání	1371 - 1399	$^{\circ}\text{C}$
Teplotní součinitel el. odporu	$10\cdot 10^{-6}$	K^{-1}

Tabulka 2.4 - Chemické složení oceli 316L [12]

-	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
%	kolísá	16-18	10-14	2-3	≤ 2	≤ 1	$\leq 0,1$		$\leq 0,045$	$\leq 0,03$	

Tabulka 2.5 - Mechanické vlastnosti oceli 316L po tepelném zpracování [12]

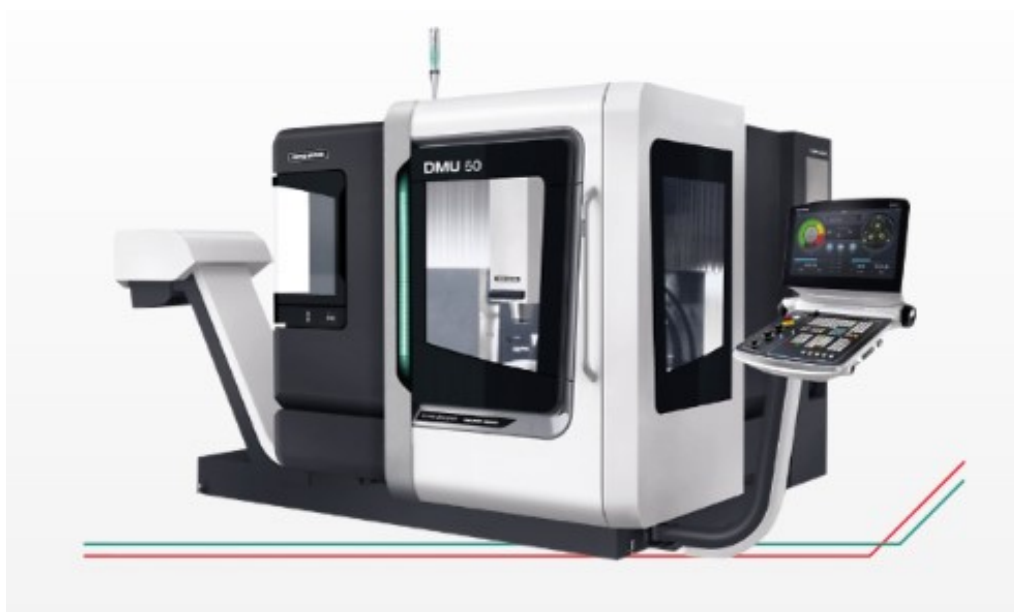
Mez pevnosti v tahu		
Vodorovný směr (XY)	676±2	MPa
Svislý směr (Z)	624±17	MPa
Mez kluzu		
Vodorovný směr (XY)	547±3	MPa
Svislý směr (Z)	494±14	MPa
Poměrné prodloužení		
Vodorovný směr (XY)	43±2	%
Svislý směr (Z)	35±8	%
Modul pružnosti		
Vodorovný směr (XY)	197±4	GPa
Svislý směr (Z)	190±10	GPa
Tvrdost podle Vickerse		
Vodorovný směr (XY)	198±8	HV0,5
Svislý směr (Z)	208±6	HV,05
Drsnost povrchu Ra		
Vodorovný směr (XY)	4 – 6	μm
Svislý směr (Z)	4 – 6	μm

2.3 Obráběcí stroj

Pro obrábění tohoto experimentu bylo zvoleno 5 – ti osé frézovací centrum DMU 50 od firmy DMG MORI. Obráběcí centrum se nachází v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské technologie na Fakultě strojní VŠB – Ostrava. Tento univerzální CNC frézovací stroj se vyznačuje inovativní technologií. Kromě standartního pevného stolu je k dispozici také otočný stůl pro 5 – ti osé obrábění. Zařízení se vyznačuje vysokými kvalitami, jako je rychlý průchod, digitální pohony ve všech osách a vysokootáčkové motorové vřeteno. Řídicím systémem DMU 50 je Heidenhaim iTNC 530 HSC. Technické parametry obráběcího centru jsou v následující tabulce 2.3. [13]

Tabulka 2.6 - Technické parametry DMU 50 [13]

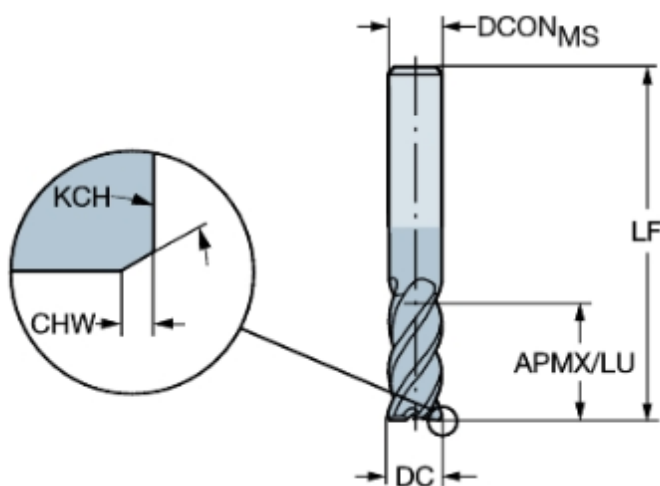
Funkce	Technické parametry	Jednotky
Pojezdy v osách X, Y, Z	500, 450 ,400	mm
Otáčky	20 – 18000	min ⁻¹
Výkon (40/100 % zatížení)	35/25	kW
Rychloposuv	24000	mm·min ⁻¹
Točivý moment	130 / 87	Nm
Rozměr otočného stolu	630 x 500	mm
Hmotnost troje	4480	kg



Obrázek 2.5 - Obráběcí stroj DMG MORI DMU 50 [13]

2.4 Obráběný nástroj

Pro experiment byla zvolena čtyřbřitá monolitní karbidová stopková fréza s označením 1P341-1000-XA 1630 od firmy Sandvik Coromant. Společnost Sandvik Coromant nabízí produkty světové třídy pro soustružení, frézování a vrtání. Tento univerzální nástroj je navržen pro vysoký výkon a bezpečné obrábění různých materiálů a tvarů. Jednotlivé parametry použitého nástroje jsou uvedeny v tabulce 2.7. [14]



Obrázek 2.6 - Fréza 1P341-1000-XA 1630 [14]

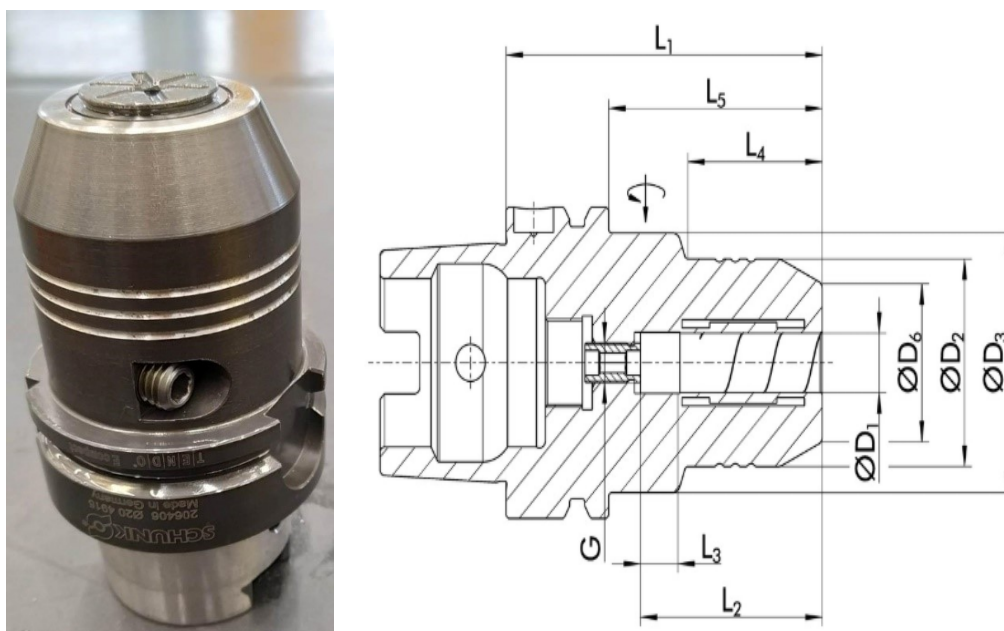
Tabulka 2.7 - Základní technické parametry frézy 1P341-1000-XA 1630 [14]

1P341-1000-XA 1630					
DCON [mm]	DC [mm]	LU [mm]	LF [mm]	KCH [°]	CHW [mm]
10	10	22	72	45	0,1

2.4.1 Upínač

Pro upnutí nástroje byl zvolen upínač TENDO EC HSK – A63 Ø20x80 od společnosti Schunk sídlící v Německu. V dnešní době patří mezi nejvýznamnější špičku ve výrobě upínacích nástrojů.

Princip moderního hydraulického upínače Schunk spočívá v tom, že při utahování upínacího šroubu se pohybuje píst s těsnícím prvkem a tím se zvyšuje tlak kapaliny v komorovém systému, přičemž dochází k deformaci rozpínacího pouzdra a upnutí vložené stopky nástroje. Zvýšená přesnost, upnutí a přenos kroutícího momentu způsobuje spirálová drážka, která stírá nečistoty na stopce a vytváří pro ně prostor. [17]



Obrázek 2.7 - Upínač TENDO EC HSK A63

Tabulka 2.8 - Rozměry upínače TENDO EC HSK A63 [18]

TENDO EC HSK A63 Ø20x80											
D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D ₃ [mm]	D ₆ [mm]	L ₁ [mm]	L ₂ [mm]	L ₃ [mm]	L ₄ [mm]	L ₅ [mm]	G [-]	M _{min} [Nm]	Váha [kg]
20	52,5	52,5	38	80	51	10	54	54	M8x1	520	1,3

2.5 Řezné podmínky

Vliv řezných podmínek je velmi podstatným faktorem při obrábění s cílem dosáhnout efektivního procesu obrábění. Nízké řezné podmínky zajišťují nízkou produktivitu i nízké náklady, naopak vysoké řezné parametry zajišťují vysokou produktivitu, ale i větší náklady. Kombinací řezných podmínek se může dosáhnout optimálního opotřebení nástroje, zamezení vzniku vibrací a dobré kvality povrchu.

Pro nerezovou ocel 316L bylo zvolené válcové frézování na stroji DMG MORI DMU 50. Během experimentu byla konstantní řezná rychlost $v_c = 40 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, posuv za zub $f_z = 0,1 \text{ [mm]}$ a hloubka řezu $a_p = 0,2 \text{ [mm]}$. Celý proces frézování probíhal bez chlazení a metodou sousledného frézování. Stanovené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 2.9.

Výpočet otáček:

Dle řezné rychlosti 40 m.min^{-1} a průměru frézy 10 mm byly dopočítány otáčky n .

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

$$n = \frac{40 \cdot 1000}{\pi \cdot 10}$$

$$n = 1274 \text{ min}^{-1}$$

Výpočet posuvové rychlosti:

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z_n \quad (2.2)$$

$$v_f = 0,1 \cdot 1274 \cdot 4$$

$$v_f = 509,9 \text{ mm.min}^{-1}$$

Tabulka 2.9 - Zvolené řezné podmínky pro experiment

Parametr	Značení a jednotka	Hodnota
Hloubka řezu	$a_p \text{ [mm]}$	0,2
Řezná rychlost	$v_c \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$	40
Otáčky	$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	1274
Posuv za zub	$f_z \text{ [mm]}$	0,1
Posuvová rychlost	$v_f \text{ [mm.min}^{-1}\text{]}$	509,9
Metoda	-	sousledné
Kapalina	-	bez chlazení

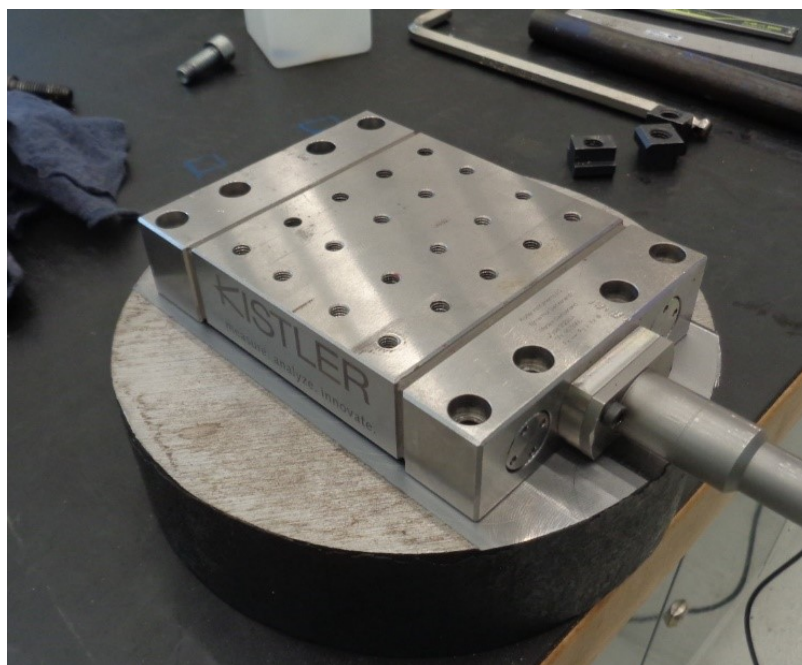
2.6 Zařízení pro měření sil při frézování

Hlavní komponenty pro sestavení dynamometru:

- Dynamometr
- Zesilovač
- DAQ box
- Propojovací kabely
- PC a program DynoWare

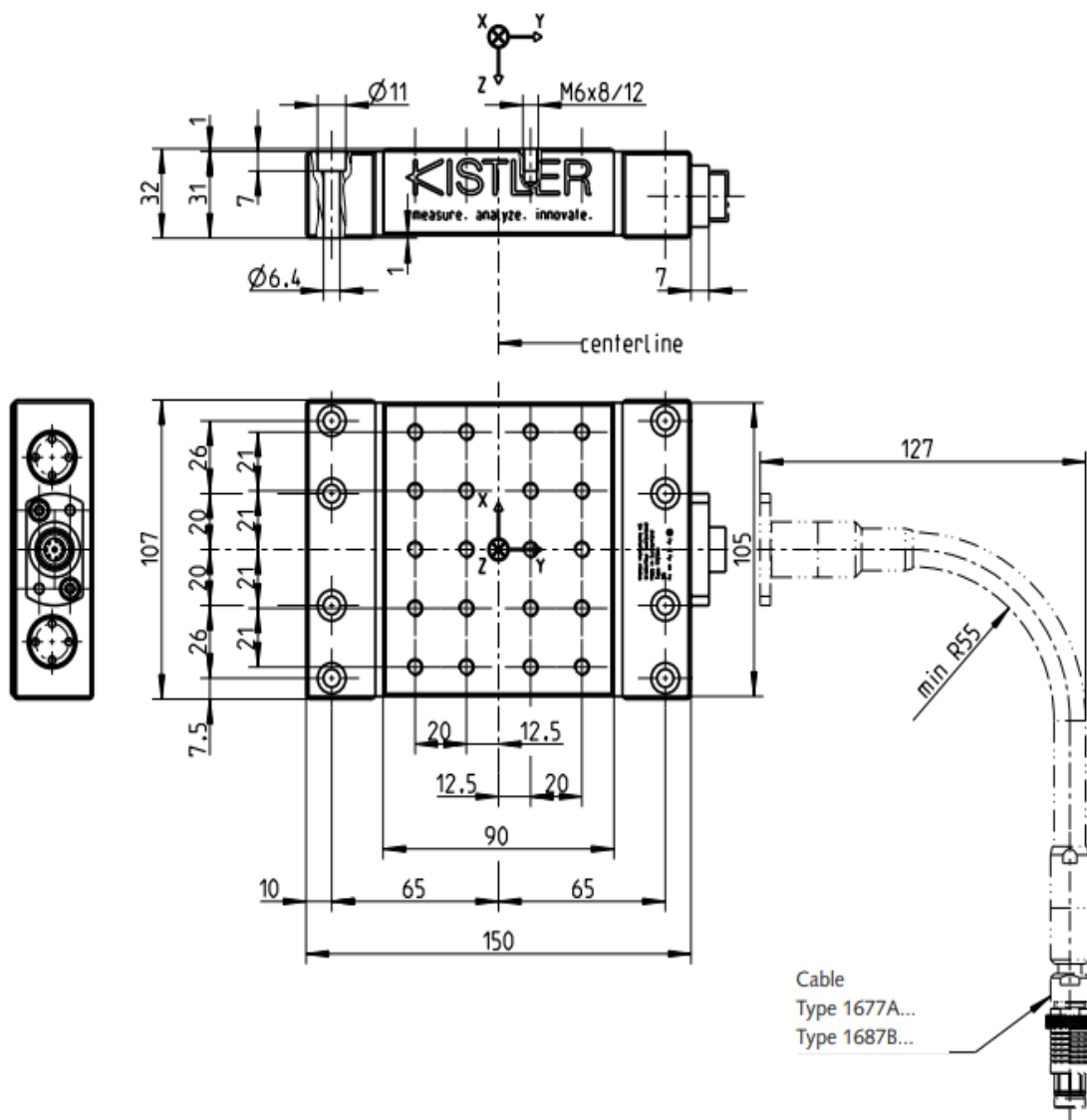
2.6.1 Dynamometr KISTLER 9129AA

Pro měření řezných sil při frézování byl použit třísložkový stacionární dynamometr 9129AA od firmy Kistler Eastern Europe s.r.o. Tento dynamometr slouží k získání experimentálních dat při obrábění pro měření dynamických změn velkých sil. [20]



Obrázek 2.8 - Dynamometr Kistler 9129AA

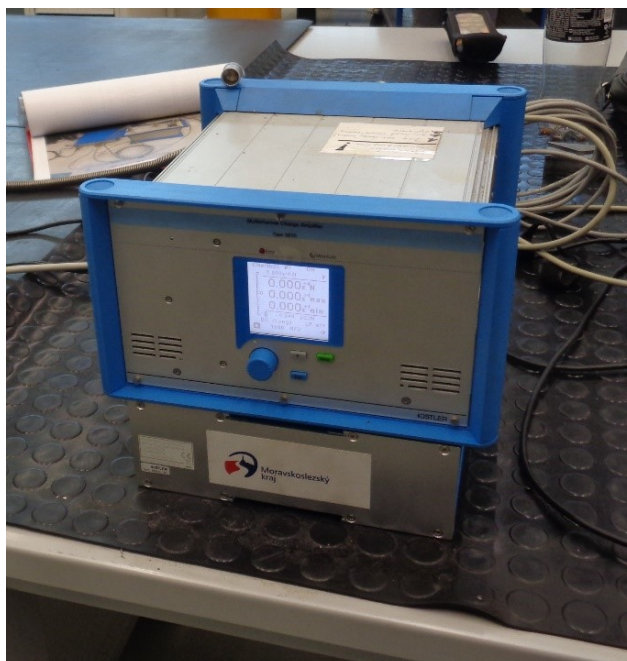
Dynamometr se skládá ze čtyř třísložkových snímačů. Každý snímač síly obsahuje desky z krystalu, z nichž je jeden citlivý na tlakovou sílu v ose Z a další dva na smykové tření síly v ose X a Y. Síly jsou měřeny prakticky bez posunutí. Výstupy čtyř vestavěných snímačů síly jsou spojeny s 9 pólovou přírubou. Čtyři senzory jsou namontovány k zemní izolaci. Krystalové desky jsou nejčastěji vyrobené z křemene, seignettových solí nebo materiálu na bázi titaničitanu barnatého. [20]



Obrázek 2.9 - Deska dynamometru s rozměry [20]

2.6.2 Zesilovač 5070 A

Tento typ je k dispozici ve 4 nebo 8 kanálové verzi. Slouží k výpočtu tří složek výsledných sil v reálném čase a výsledného vektoru ve spojení s vícesložkovými dynamometry. Hodnoty lze nastavit přímo na zesilovači. Grafický displej z tekutých krystalů je schopen zobrazit všechny počáteční, okamžité, minimální a maximální hodnoty. Podle spotřeby mohou být jednotlivé kanály přepínány na displeji. [21]



Obrázek 2.10 - Zesilovač 5070 A

2.6.3 DAQ Box Kistler 5697A1

System byl vyvinut speciálně pro piezoelektrické měřicí systémy a jejich zesilovače. Mají vynikající rozlišení a velmi vysokou frekvenci (až 125 kS/s) s osmy kanály. System je připojen přes port USB 2.0, a není závislý na rozhraní PCI, PCMCIA, a může být jednoduše připojený k počítači. [22]






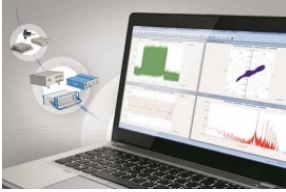


Obrázek 2.11 - DAQ Box Kistler 5697A1 [22]

2.6.4 DynoWare

Univerzální software, který je vhodný pro měření sil pomocí dynamometru. Podporuje stacionární i rotační měřicí systémy. Slouží k vizualizaci měřených křivek s výpočty a grafickými funkcemi v reálném čase.

Tabulka 2.10 - Seznam nejdůležitějších komponentů

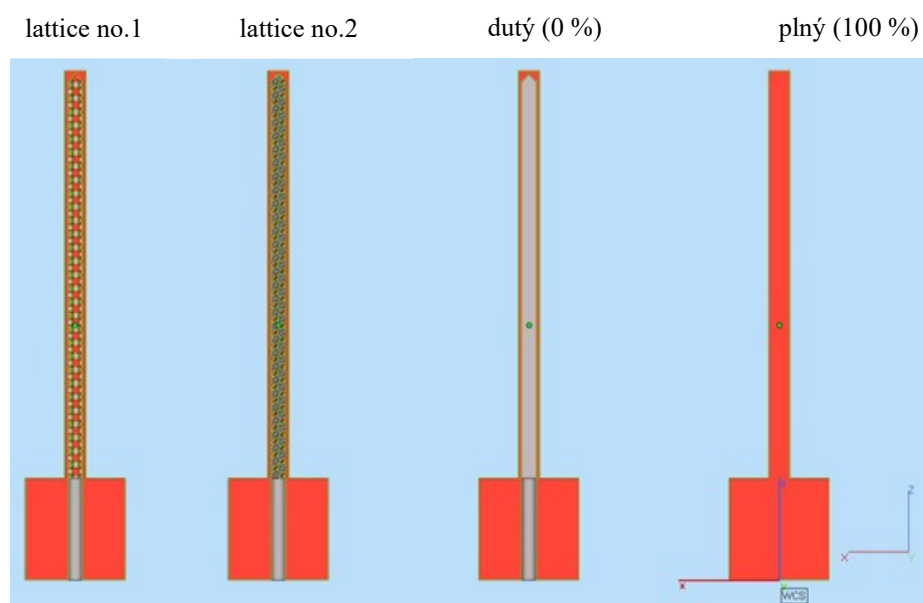
Dynamometr		Typ 9129AA
Propojovací kabel		Typ 1677A5
Zesilovač		Typ 5070 A
Propojovací kabely		Typ 1700A11A2
		Type1200A27
DAQ box		Typ 5697A1
PC se softwarem		Notebook s DynoWare

2.7 Označování vzorků

Pro přehledné vyhodnocení a zpracování řezných sil byl navržen systém, který určuje strukturu a číslo vzorku.

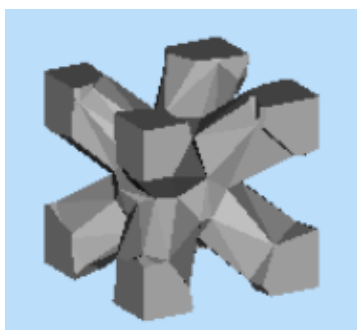
$$100 \% - 1 - L$$

100 %	–	struktura vzoru
1	–	číslo vzorku
L	–	levá strana



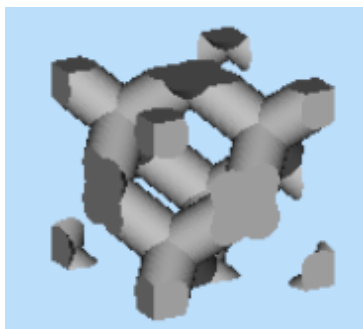
Obrázek 2.12 - Přehled struktur vzorků

- Vzorek 0 % – Jedná se o vzorek, jehož funkční část je dutá a síla všech stěn je 0,5 mm.
- Vzorek 100 % – Tento typ vzorku je plný.
- Vzorek No.1 – Jedná se o vzorek, jehož objem je vyplněn kvádry o rozměrech 2 x 10 x 10 mm se strukturou vybranou z knihovny programu Materialise Magics 22.0. Struktura je tvořena tělesovými uhlopříčkami se zaoblenými uzly. Vnitřní strukturu pomyslného kvádrů reprezentuje obr. 2.13.



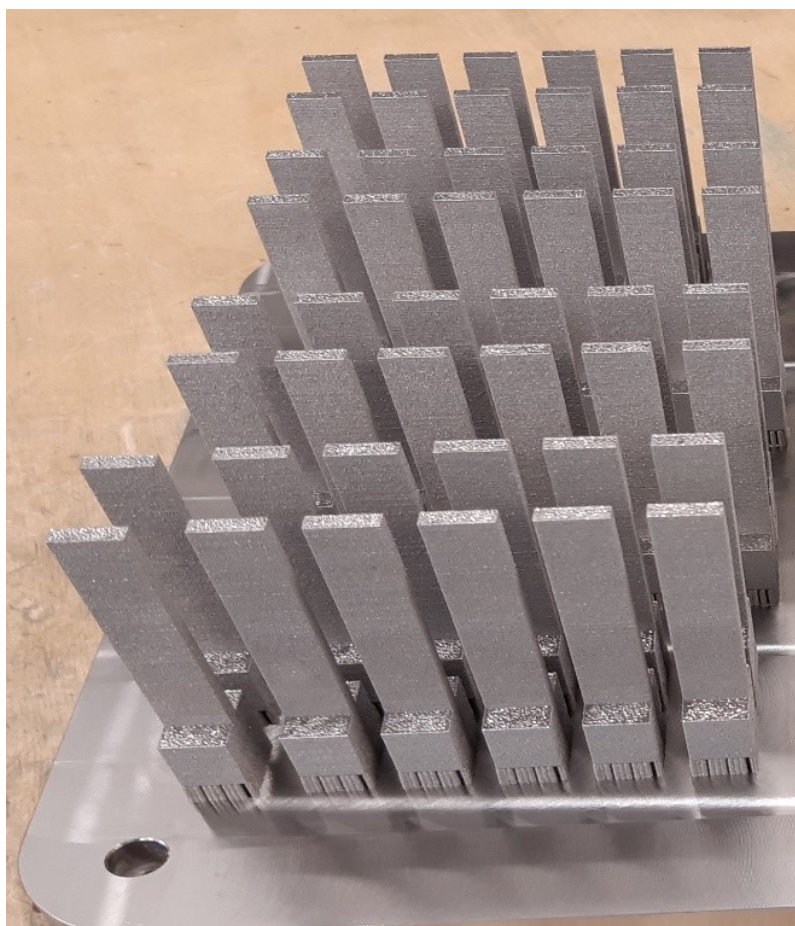
Obrázek 2.13 - Vnitřní struktura vzorku No.1

- Vzorek No. 2 – Tento typ vzorku má objem vyplněn kvádry o rozměrech 2 x 10 x 10 mm. Struktura kvádrů je vybraná také z knihovny programu Materialise Magics 22.0. Struktura je tvořena diamanty. Vnitřní struktura vzorku je zobrazena na obrázku 2.14.

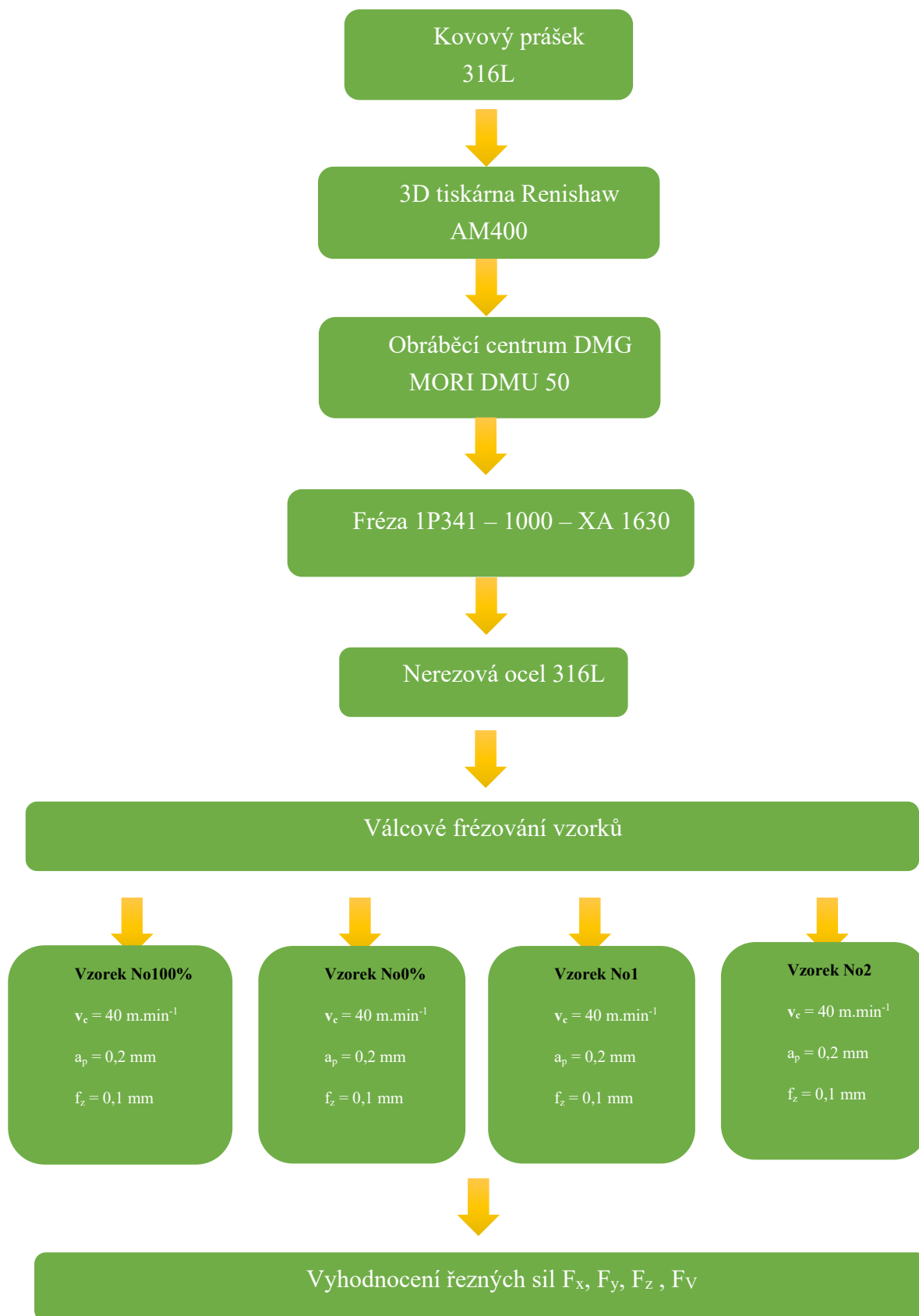


Obrázek 2.14 - Vnitřní struktura vzorku No.2

Po dokončení procesu výroby technologií SLM na stroji Renishaw AM 400, byl z pracovní komory odsán přebytečný kovový prášek. Základní deska s vyrobenými vzorky byla vyňata ze stroje a vzorky posléze odřezány pásovou pilou z jejího povrchu.



Obrázek 1.15 - Ukázka vzorků na základní desce



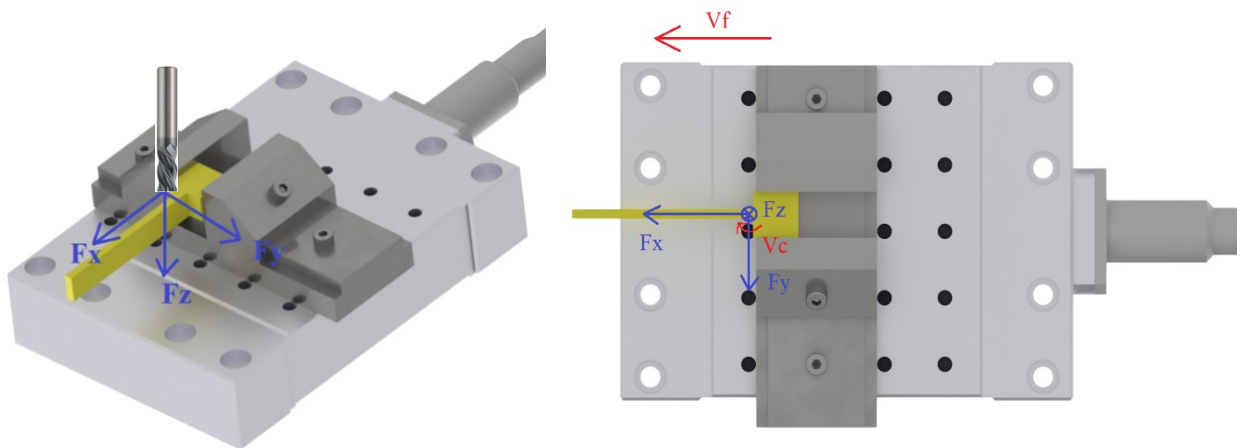
Obrázek 2.16 - Schéma experimentu

3. Vyhodnocení experimentu

Praktická část diplomové práce se zabývá analýzou řezných sil při frézování oceli 316L pod 3D tisku za konstantních řezných podmínek a za sucha. V experimentální části se provádělo celkem 8 testů se čtyřmi různými strukturami. Obráběný polotovár byl upnut do svěraku a bylo provedeno vyrovnaní vzorku pomocí měřicí sondy natočením pracovního stolu obráběcího centra. Frézovaná délka byla 54 mm z levé i pravé strany. Po každém testu byly měřeny řezné síly F_x , F_y , F_z pomocí dynamometru Kistler 9129 AA a softwaru DynoWare.

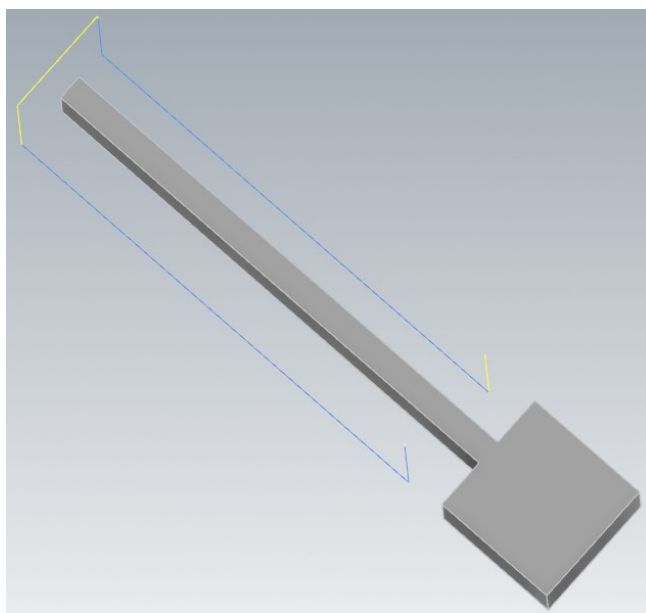
Před každým měření byla zapnuta měřící aparatura Kistler. Po frézování bylo měření zastaveno a celý proces se opakoval. Pomocí softwaru DynoWare byly zaznamenány jednotlivé složky síly F_x , F_y , F_z .

Během obrábění byly zaznamenány hodnoty ve třech různých směrech. Ve směru složky F_x , ve směru složky F_y a ve směru F_z . Tato data byla zapotřebí zpracovat a vyhodnotit. Pro každý vzorek byl zkoumán rozkmit v ose x, y, z a hodnoty RMS (efektivní hodnota) v ose x, y, z. Následně byla vygenerována výsledná síla F pro všechny typy vzorku. Tyto hodnoty jsou pro přehlednost vloženy do tabulek a grafu a jednotlivě rozebrány.



Obrázek 3.1 - Schéma působení složek řezných sil během experimentu měření vymodelováno pomocí Autodesk Inventor 2020

Následující obrázek zobrazuje dráhu nástroje při válcovém frézování vytvořené v programu Mastercam 2017.

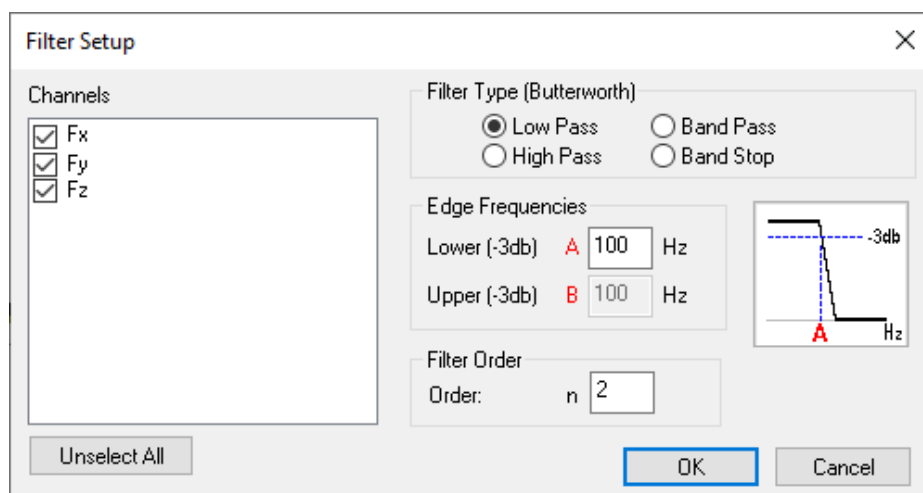


Obrázek 3.2 - Dráha nástroje vytvořeno v programu Mastercam 2017

Jelikož při měření byla použita vysoká frekvence dynamometru, která obsahuje velké množství dat, které jsou nevypovídající, je nutné odstranit pomocí funkce Low Pass. Vysoká frekvence dat udává přesnost analýzy silového zatížení, které poskytují větší množství naměřených dat. Pro výpočet vlastní frekvence byl použit vztah, s ohledem na otáčkách stroje a počet zubů nástroje. Vlastní frekvence dle výpočtu byla zvolena 100 Hz. To znamená, že nás pro každou sekundu zajímá 100 nejvyšších hodnot. Pro zpracování dat byl použit program Microsoft Excel.

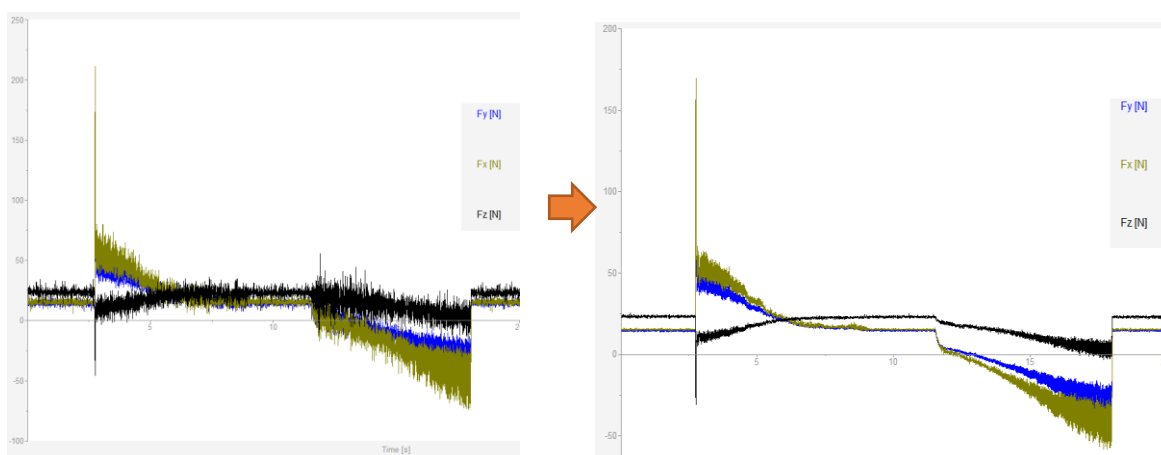
$$f = \frac{n}{60} \cdot z \quad (3.1)$$

$$f = \frac{1274}{60} \cdot 4 = 84,93 \text{ Hz} \cong 100 \text{ Hz}$$



Obrázek 3.3 - Filtrace dat v softwaru DynoWare

Na následujícím obrázku je zobrazen rozdíl naměřených hodnot před a po filtraci. Na obrázku 3.4 je zobrazen záznam měření délky 25 s, kde se mění rozkmity, jejichž hodnota se po filtraci snížila. Proces úběru materiálu začínal od 3 s do 9 s pak byl přejezd, a od 12 s do 18 s byla frézovaná levá část obrobku. Hodnoty při najíždění do materiálu a vyjíždění z materiálu se liší od samotného obrábění, proto bylo potřeba vždy použít usek mezi nájezdem a výjezdem.

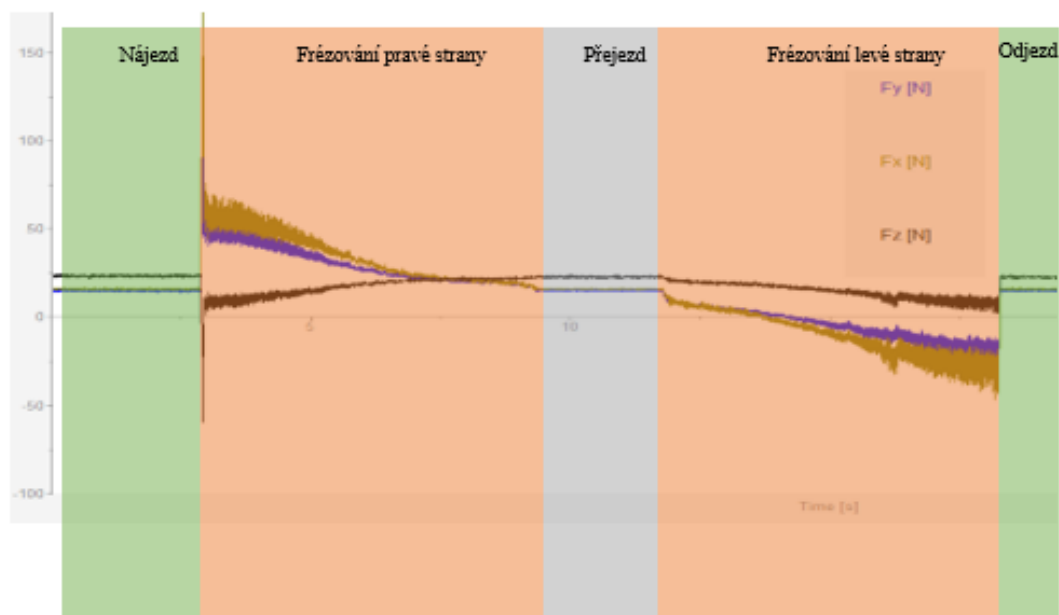


Obrázek 3.4 - Graf naměřených hodnot před a po filtraci

Následující tabulka 3.1 zobrazuje časový rozbor řezu. Celkový strojní čas $t_s = 21$ s. Čas není podstatný, protože se u jiných řezů mírně liší. Zajímavý je procentuální podíl času v jednotlivých fázích řezu. Jednotlivé fáze řezu jsou zobrazeny na obrázku 3.5.

Tabulka 3.1 - Procentuální podíl strojního času

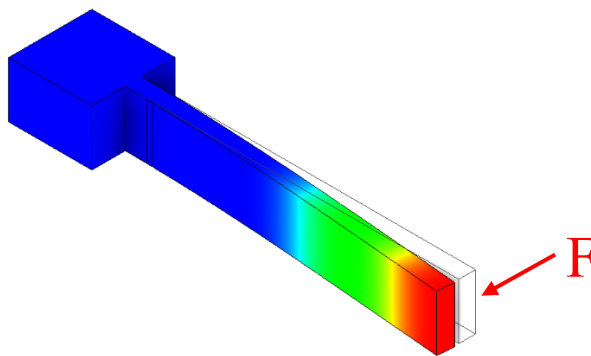
Fáze řezu	Interval zkoumaného řezu [s]		Strojní čas zkoumaného řezu [s]	Procentuální podíl strojního času z celkového
	od	do	[s]	[%]
Nájezd	0	3	3	14.3
Frézování pravé strany	3	9.5	6.5	30.95
Přejezd	9.5	11.5	2	9.5
Frézování levé strany	11.5	18	6.5	30.95
Odjezd	18	21	3	14.3
Suma			21	100



Obrázek 3.5 - Rozbor jednoho řezu

3.1 Predikce průhybu obrobku

Při frézování vzorků docházelo k postupně měnící tuhosti s postupným odebráním materiálu z obrobku. Tuhost se zmenšovala a tím se frézovaná součástka stala více náchylnou na vznik samobuzeného chvění. Chvění způsobovalo zhoršení kvality obrábění a nedodržení rozměrů obrobku.

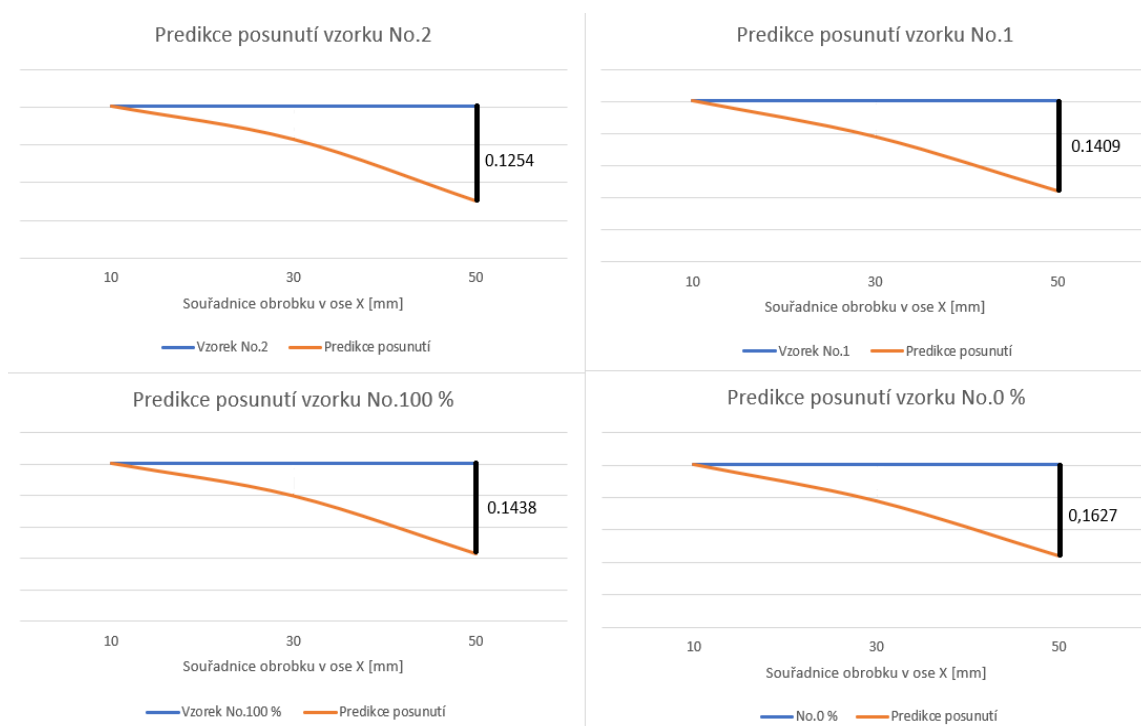


Obrázek 3.6 - Predikované posunutí v prostředí Inventor 2020

Tabulka 3.2 - Predikované posunutí

Vzorek	No.0 %			No.1			No.2			No. 100 %		
Měřená část	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
Před frézování	3.5253	3.4862	3.4907	3.4363	3.4685	3.4347	3.5262	3.5227	3.4612	3.5283	3.5417	3.4908
Po frézování	3.3123	3.2427	3.1150	3.2683	3.2158	3.1258	3.3057	3.2208	3.1153	3.2950	3.2165	3.1137
Rozdíl	0.2130	0.2435	0.3757	0.1680	0.2527	0.3089	0.2205	0.3019	0.3459	0.2333	0.3252	0.3771
Predikované posunutí	0.1627 mm			0.1409 mm			0.1254 mm			0.1438 mm		

Na následujícím obrázku 3.7 je znázorněno grafické srovnání průhybu vzorků pomocí vypočtených hodnot z tabulky 3.2.



Obrázek 3.7 - Predikce posunutí vzorků

Z obrázku 3.7 lze vyčíst, že při frézování vzorků docházelo vlivem sil k průhybu obrobku. Hodnoty největšího průhybu byly naměřeny na konci obrobku. Vzhledem k tomu, že byla zvolna hloubka řezu 0,2 mm docházelo u vzorku No. 0 % k minimálnímu úběru, protože posunutí na konci vzorku dosahovalo 0,01627 mm.

3.2 Vyhodnocení silového zatížení při frézování

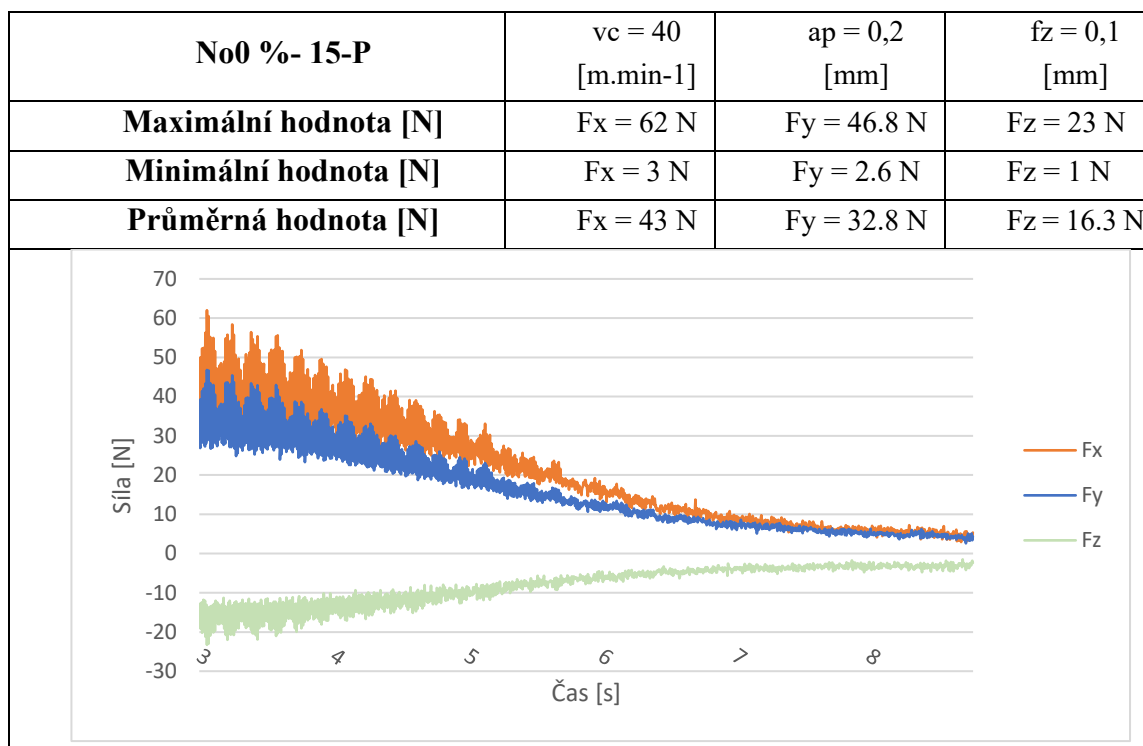
Silové zatížení bylo zaznamenáno měřicí aparaturou Kistler. Naměřená data patřičných vzorků byla pomocí PC a softwaru DynoWare ukládána. Vzhledem k tomu, že data z dynamometru obsahují velké množství informací, je nezbytné provést transformaci dat a filtraci. Data byla exportována pomocí programu DynoWare do MS Excel, kde byly jednotlivé silové složky zpracovány.

3.2.1 Vzorek No.0 % - 15

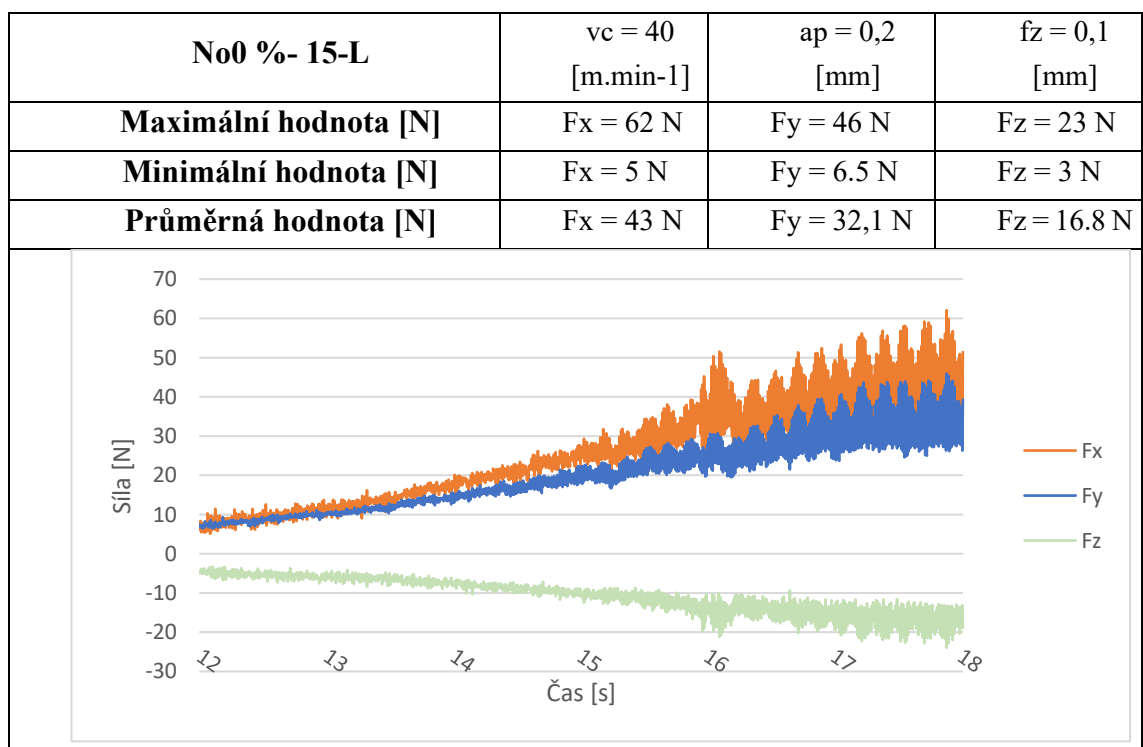
Jako první byl použit dutý vzorek No0%-15. Hodnoty pravé strany jsou zaznamenány v tabulce 3.3 pro pravou stranu a v tabulce 3.4 pro levou. Hodnoty jsou vygenerovány ze softwaru DynoWare a přes Microsoft Excel vytvořené grafy.

V tabulkách lze vidět maximální, minimální a průměrnou hodnotu řezných složek F_x , F_y , F_z

Tabulka 3.3 - Průběh měření sil vzorku No0 %-15-P



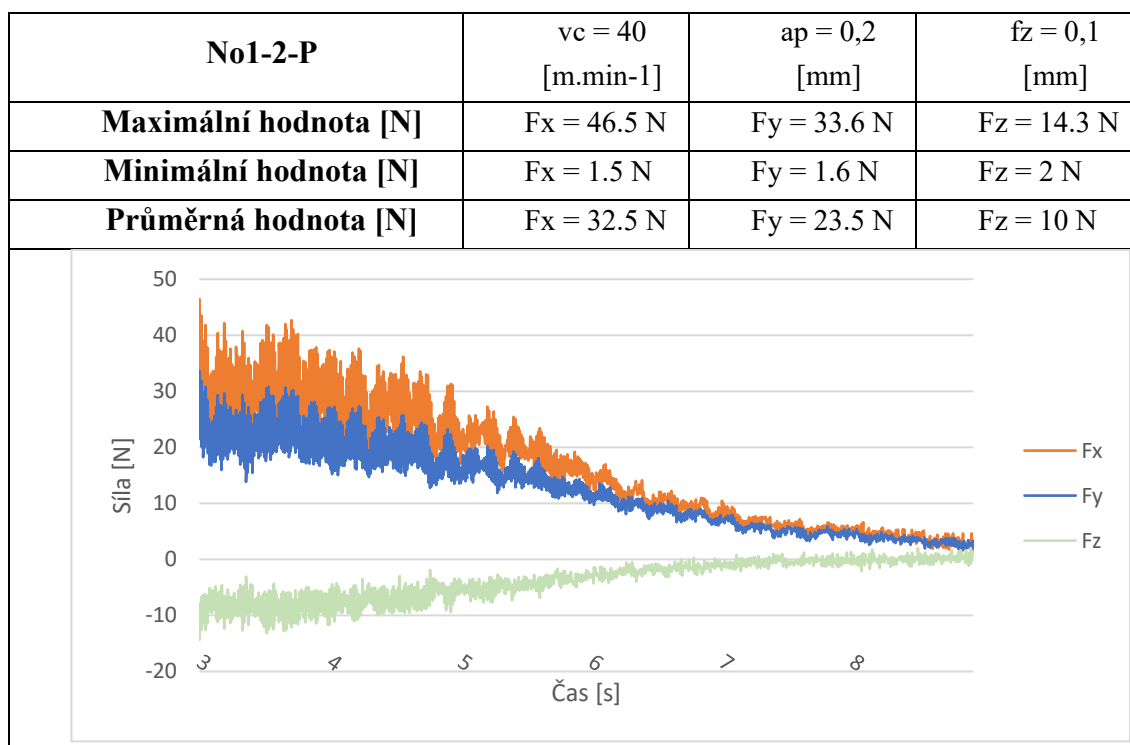
Tabulka 3.4 - Průběh měření sil vzorku No0 %-15-L



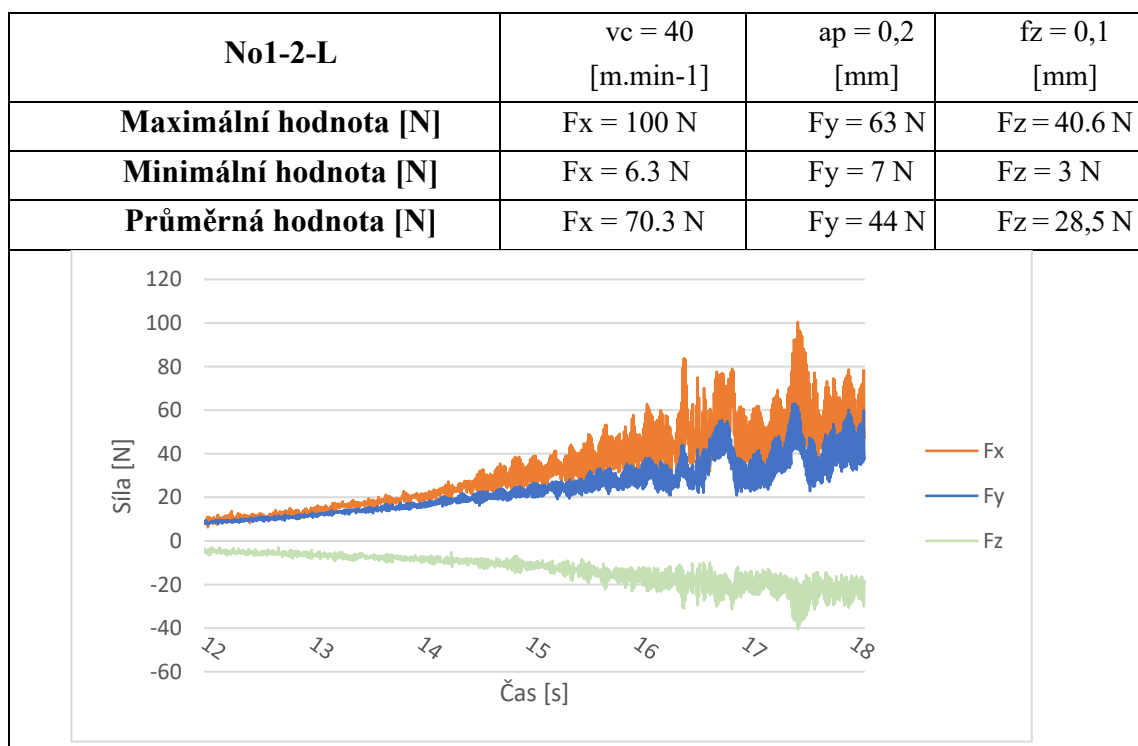
3.2.2 Vzorek No.1 - 2

Jako druhý byl použit vzorek No1-2 Hodnoty pravé strany jsou zaznamenány v tabulce 3.5. Levá strana reprezentuje tabulka 3.5.

Tabulka 3.5 - Průběh měření sil vzorku No1-2-P



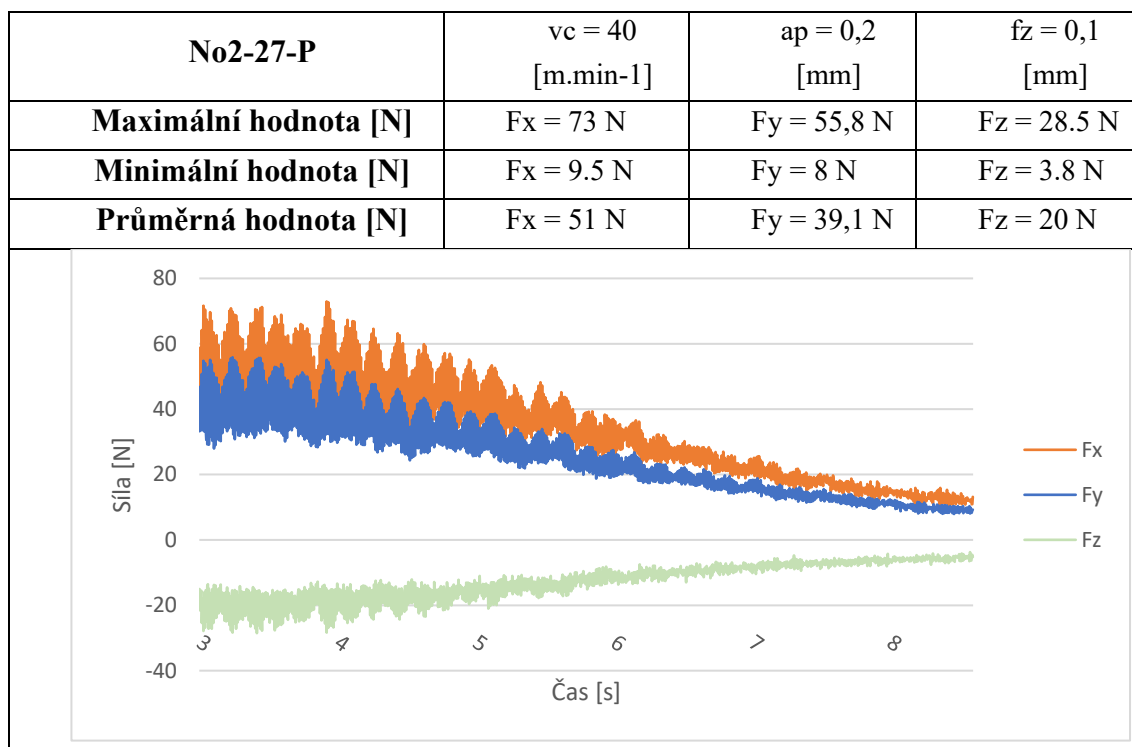
Tabulka 3.6 - Průběh měření sil vzorku No1-2-L



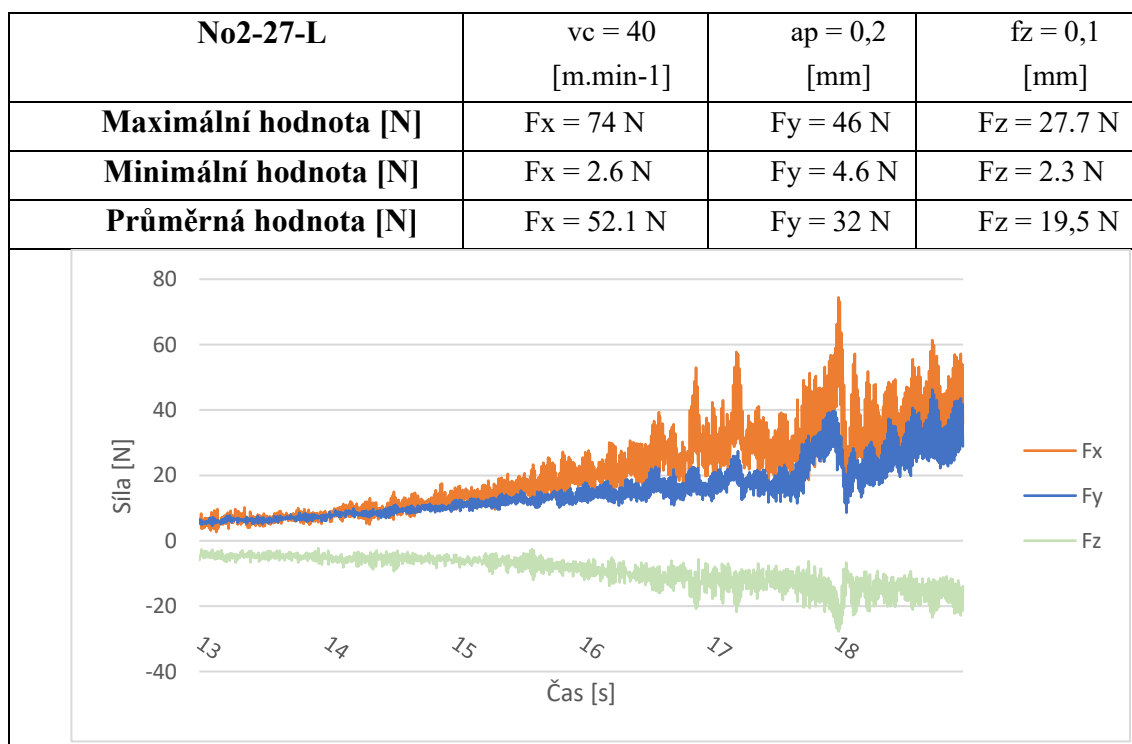
3.2.3 Vzorek No.2 - 27

Třetí v pořadí byl obráběn vzorek No2-27. Hodnoty tohoto vzorku pro pravou stranu jsou zobrazeny v tabulce 3.7, a pro levou v tabulce 3.8.

Tabulka 3.7 - Průběh měření sil vzorku No2-27-P



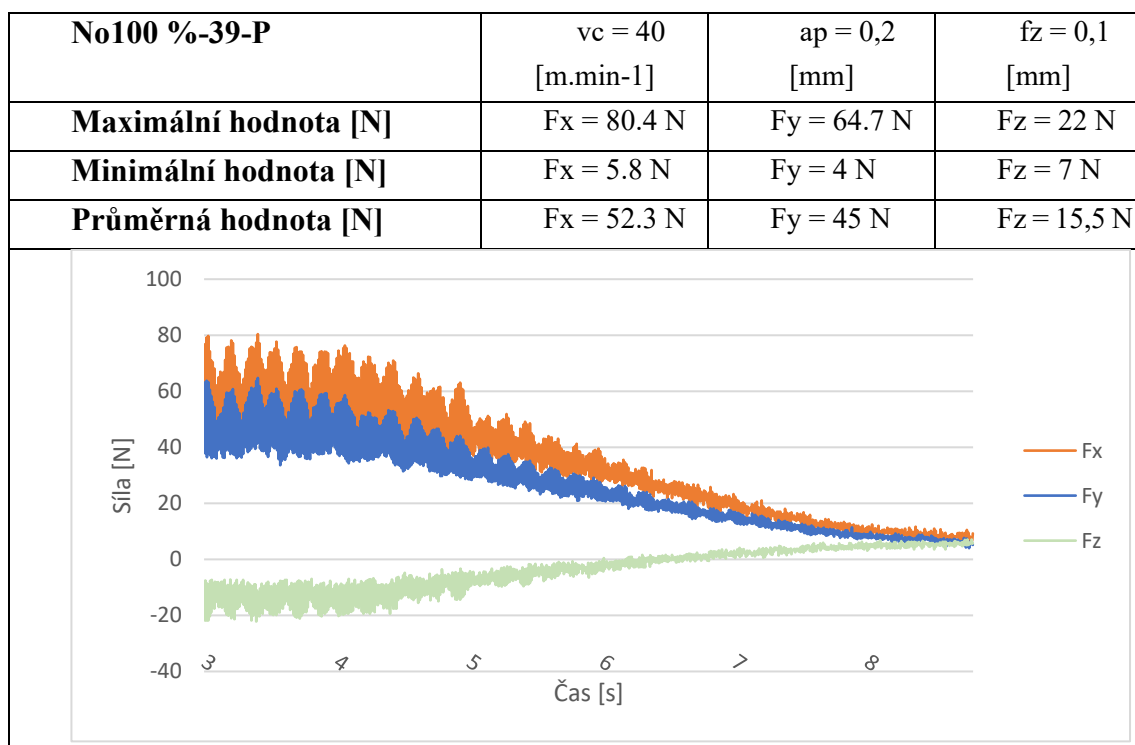
Tabulka 3.8 - Průběh měření sil vzorku No2-27-L



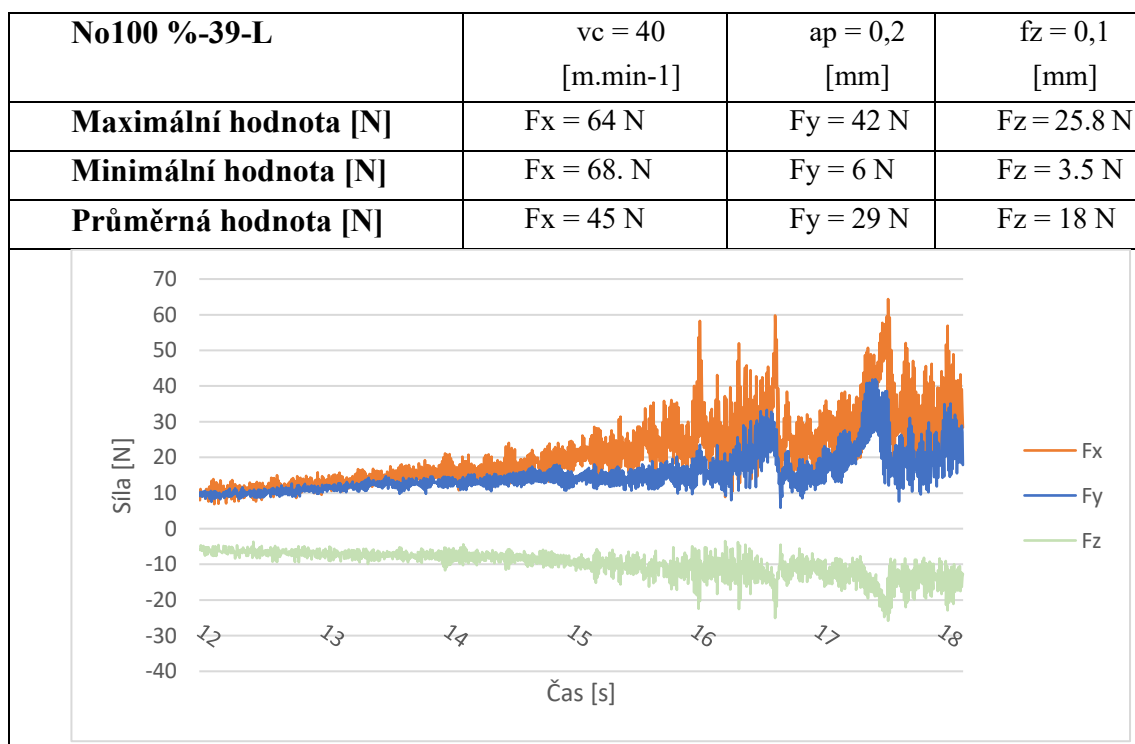
3.2.4 Vzorek No.100 % - 39

V poslední pořadí byl obráběn vzorek 39. se 100 % strukturou. Tento vzorek je zaznamenán v tabulce 3.9 (pravá strana) a 3.10 (levá strana)

Tabulka 3.9 - Průběh měření sil vzorku No100 %-39-P

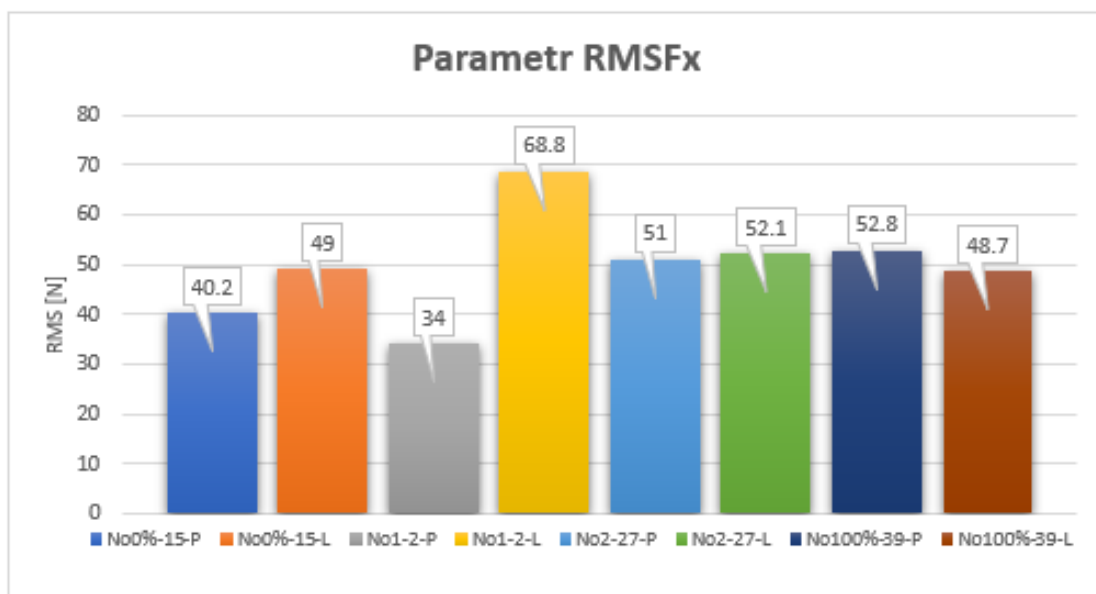


Tabulka 3.10 - Průběh měření sil vzorku No100 %-39-L



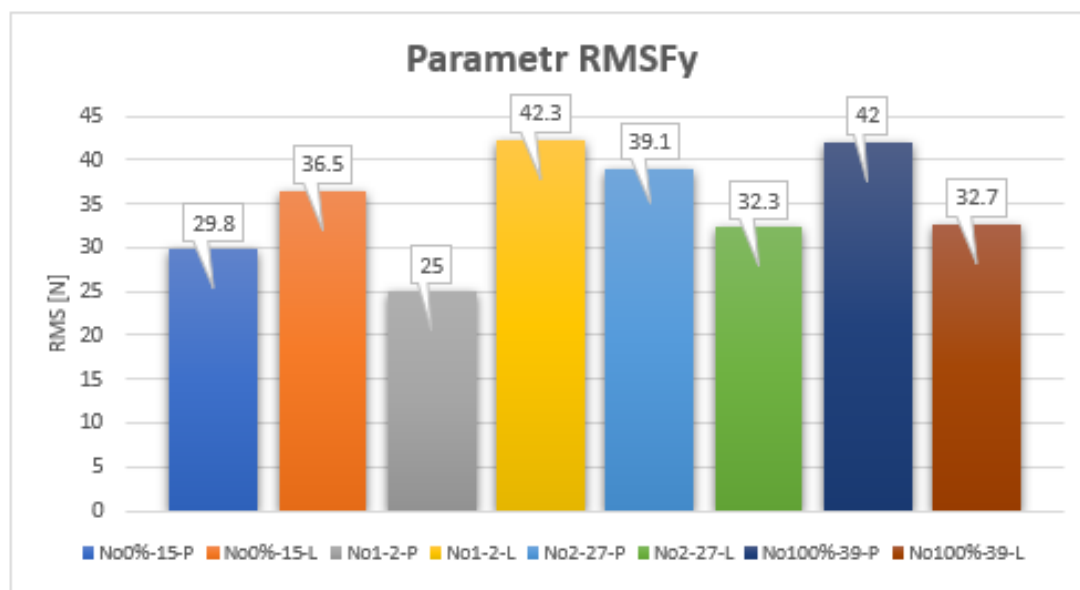
3.3 Porovnání vzorků

Tato podkapitola se zaměřuje na porovnání čtyř vzorků s různou strukturou, které byly použity při experimentu. Řeznou sílu je možné rozložit na statickou a dynamickou složku. Statická síla je průměrná hodnota v určitém časovém úseku. Dynamickou složku řezné síly je možné odfiltrovat. Nejčastější používaný parametr je RMS, resp. efektivní hodnota, která obsahuje amplitudové, ale i frekvenční charakteristiky. Hodnota RMS ukazuje průběh časového signálu, a znázorňuje schopnost hodnoty veličiny konat užitečnou práci.



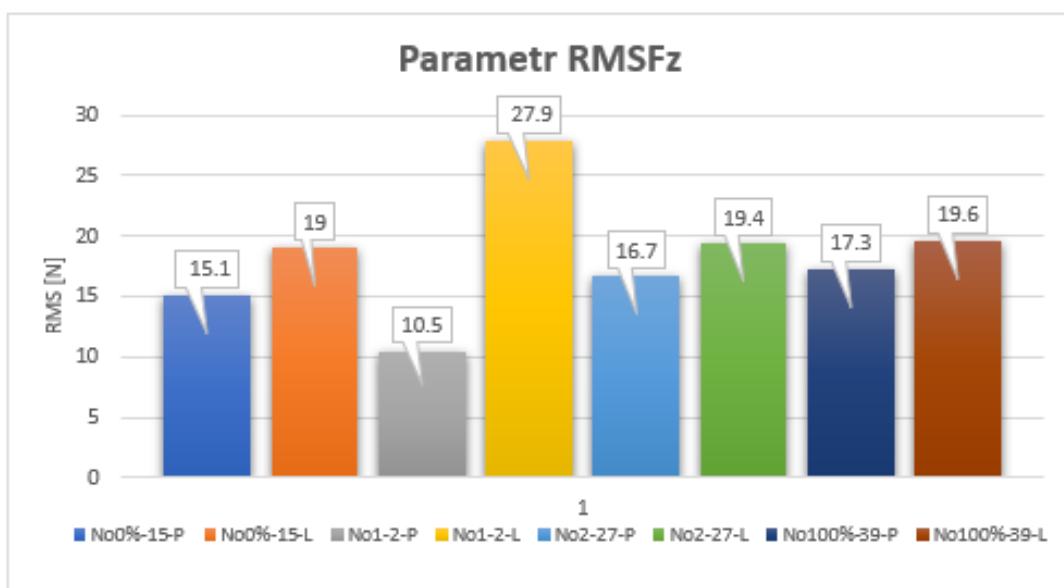
Obrázek 3.8 - Parametr RMS řezné složky F_x

Při pohledu na obrázek 3.8 je možné vidět, že největší hodnota RMS řezné složky F_x byla u vzorku No1-2-L. Naopak nejmenší hodnota RMS je u vzorku No1-2-P a No0%-15-P. Dále můžeme pozorovat, že parametr RMS u ostatních vzorků je přibližně stejný.



Obrázek 3.9 - Parametr RMS řezné složky F_y

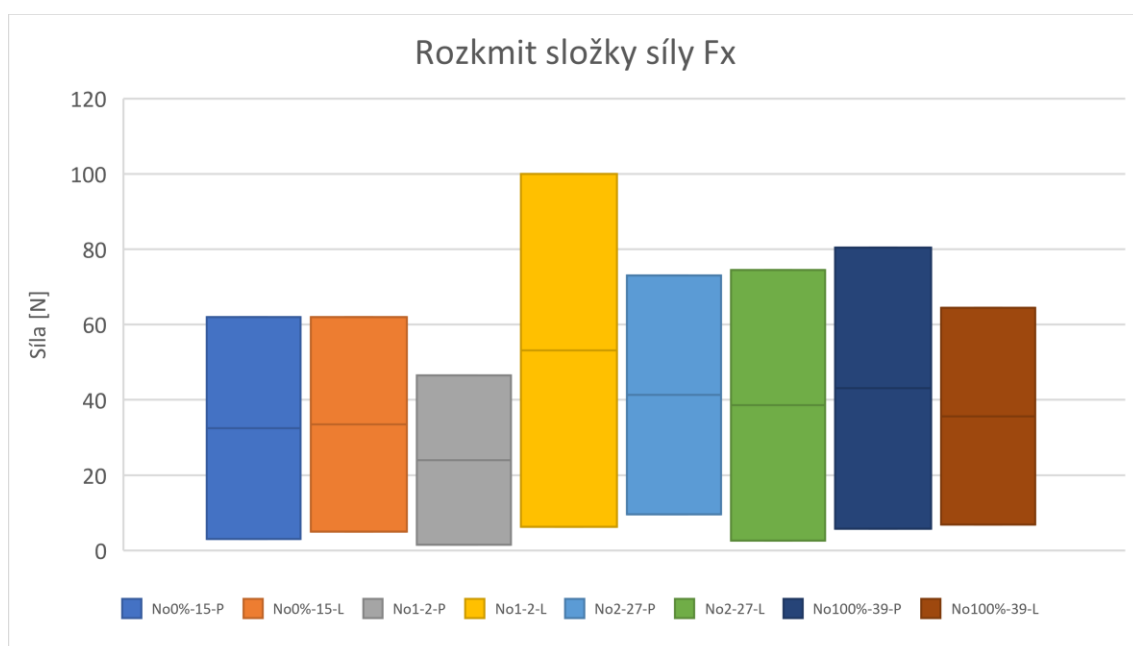
V obrázku 3.9 je možné pozorovat, že nejvyšší hodnota RMS byla zaznamenána u vzorku No1-2-L a u vzorku No100%-39-L. Dle naměřených dat byla nejmenší hodnota RMS naměřena u vzorku No1-2-P. Druhou nejmenší hodnotu dosáhl vzorek No0%-15-P.



Obrázek 3.10 - Parametr RMS řezné složky F_z

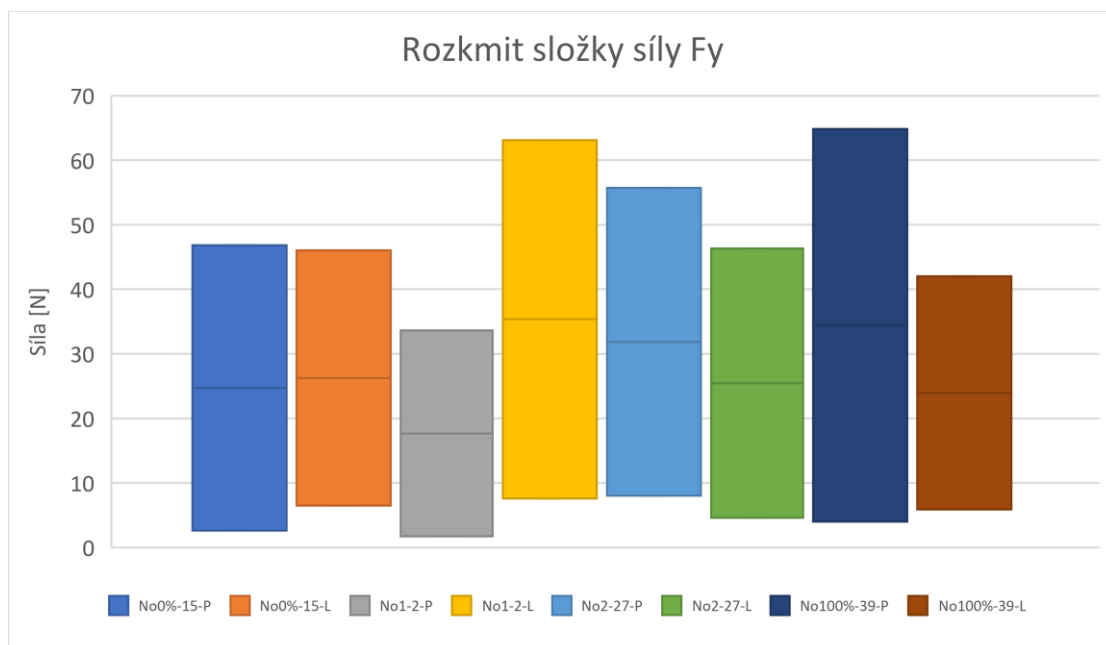
Při pohledu na obrázek 3.10 můžeme pozorovat, že největší hodnota RMS ve směru z dosáhl vzorek No1-2-L. Nejmenší hodnotu RMS ve směru osy z dosáhl vzorek No1-2-P.

Následující obrázky ukazují porovnání velikosti rozkmitu řezných složek F_x , F_y , F_z při frézování s konstantní řeznou rychlostí v_c a konstantní hloubkou řezu a_p . Znárodnují minimální a maximální hodnoty vzorků.



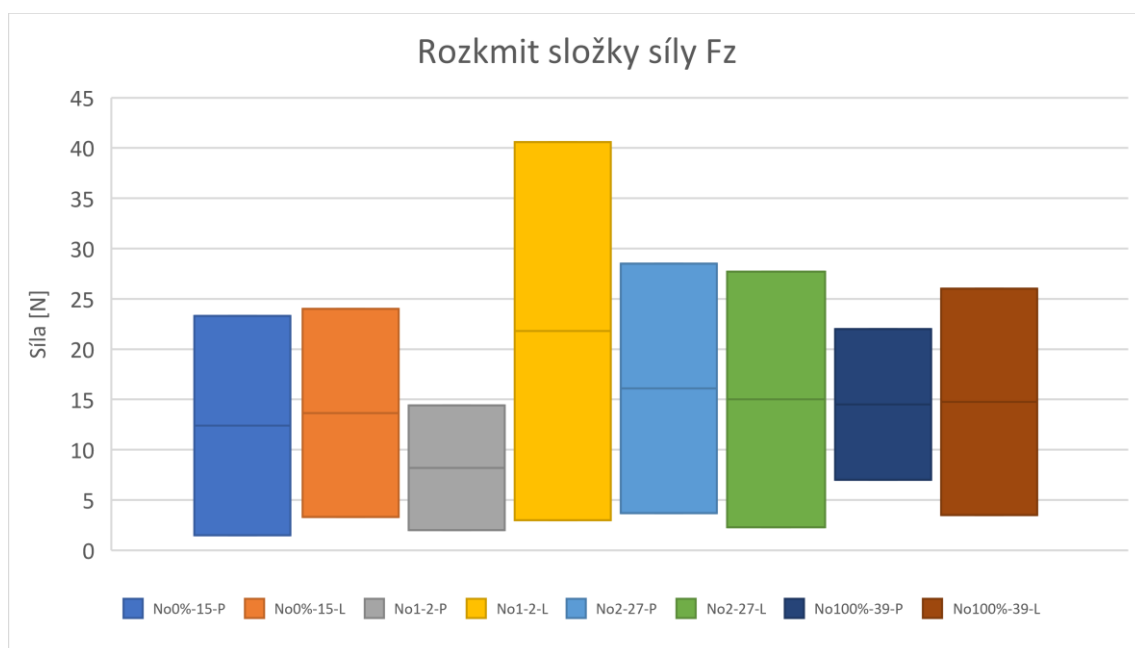
Obrázek 3.11 - Rozkmit složky síly F_x

Na obr. 3.11 je zobrazen rozptyl složky síly F_x všech vzorků. Dle grafu je patrné, že největší hodnoty rozkmitu u složky F_x je dosaženo u vzorku No1-2-L. Tato hodnota dosahuje rozkmitu 94 N. Z grafu lze dále vyčíst, že vzorek No1-2-P dosáhl nejmenšího rozkmitu 45 N. Dále lze z grafu vyčíst, že vzorek No0%-15-P dosáhl velmi podobného rozkmitu jako zkušební vzorek No0%-15-L.



Obrázek 3.12 - Rozkmit složky síly F_y

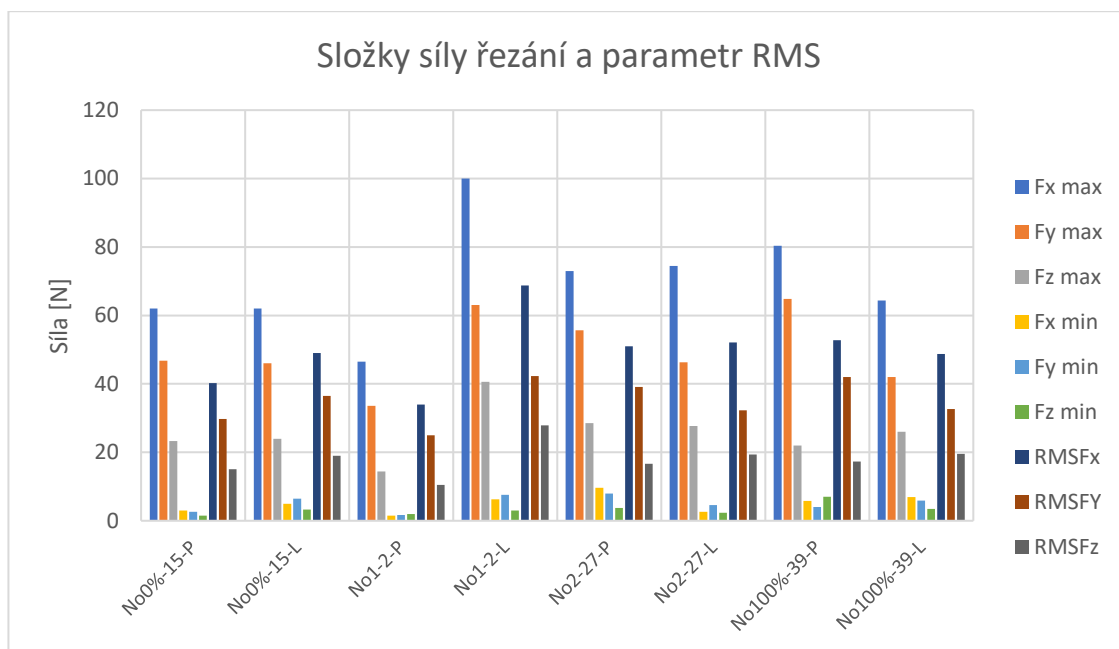
Následující obr. 3.12 zobrazuje rozkmit složek F_y . Při pohledu na graf je patrné, že největší hodnoty rozkmitu dosáhly vzorky No1-2-L a No100%-39-L. Avšak nejmenší hodnoty rozptylu 32 N dosáhl vzorek No1-2-P.



Obrázek 3.13 - Rozkmit složky síly F_z

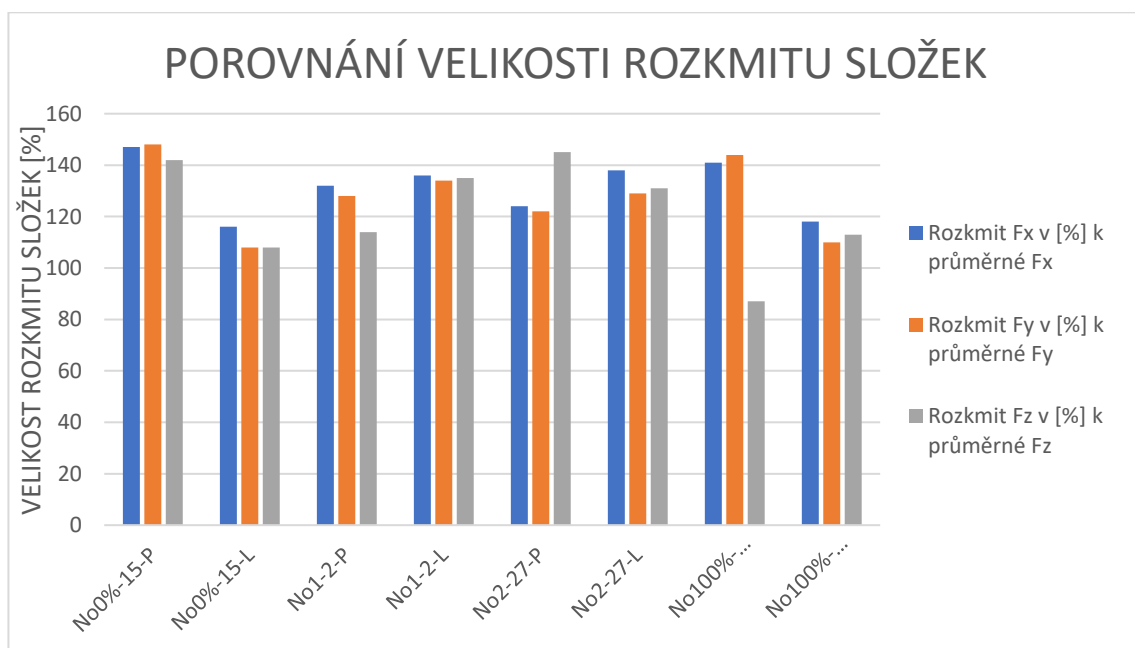
Při pohledu na obr. 3.13 můžeme pozorovat, že vzorek No0%-15-P dosáhl stejného rozkmitu 21 N jako vzorek No0%-15-L. Velmi podobného rozkmitu dosáhly vzorky No2-27-P a No2-17-L. Naopak největšího rozkmitu dosáhl vzorek No1-2-L.

Následující obrázek zobrazuje porovnání všech vzorků. Jsou zde zobrazeny maximální a minimální hodnoty složek sil a RMS hodnoty.



Obrázek 3.14 - Složky síly řezání a parametr RMS

Následující obrázek ukazuje porovnání všech typů vzorku a jejich rozkmit složek sil v procentních bodech vzhledem k jejich průměrné hodnotě.



Obrázek 3.15 - Porovnání velikosti rozkmitu složek v [%]

Pro porovnání všech vzorků je zapotřebí pracovat s velkým množstvím dat. Proto pro zjednodušení byla vytvořena tabulka 3.11 kde tyto vypočtené hodnoty jsou uvedeny. Výslednice sil byla vypočtená jako RMS hodnota ze třech směru.

Vzorový příklad pro výpočet výslednice vzorku No0 %-15- L.

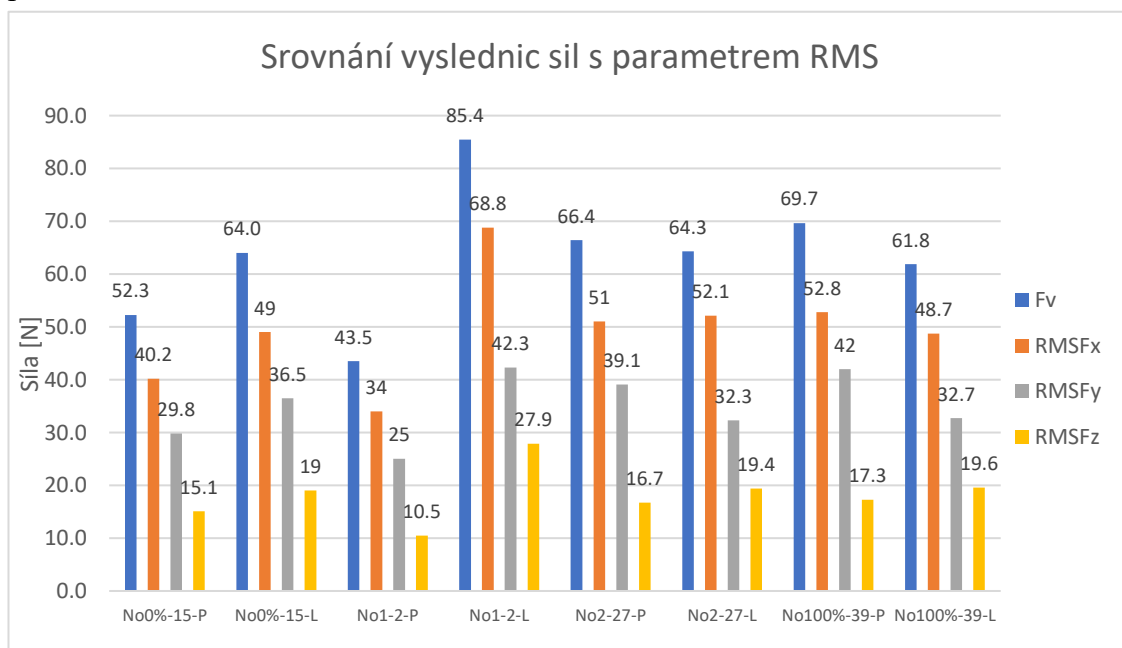
$$F = \sqrt{RMSF_x^2 + RMSF_y^2 + RMSF_z^2} \quad (3.2)$$

$$F = \sqrt{40,2^2 + 29,8^2 + 15,1^2} = 52,3 \text{ N}$$

Tabulka 3.11 - Hodnoty RMS a výslednice sil

Vzorek	RMSF _x	RMSF _y	RMSF _z	F
No0 %-15-P	40,2	29,8	15,1	52,3
No0 %-15-L	49	36,5	19	64
No1-2-P	34	25	10,5	43,5
No1-2-L	68,8	42,3	27,9	85,4
No2-27-P	51	39,1	16,7	66,4
No2-27-L	52,1	32,3	19,4	64,3
No100 %-39-P	52,8	42	17,3	69,7
No100 %-39-L	48,7	32,7	19,6	61,8

Následující obrázek ukazuje porovnání velikosti výslednic sil s parametry RMS. Na obrázku 3.16 můžeme pozorovat, že výslednice sil u vzorku No.1-2-L dosáhla největších hodnot ze všech vzorků. Pravá strana téhož vzorku dosáhla zase nejnižších hodnot. Dle naměřených hodnot můžeme říct, že tato struktura má zásadní vliv na řezné síly. Z grafického hlediska lze pozorovat, že výslednice sil pro ostatní vzorky jsou velice podobné.



Obrázek 1.16 - Porovnání výslednic sil s parametrem RMS

3.4 Zhodnocení a diskuze výsledků řezných sil

Experimentální část diplomové práce se zabývala vyhodnocením výsledné řezné síly F za předem stanovených řezných podmínek na vzorcích s různou vnitřní strukturou.

Řezné síly se u každého vzorku projevovaly trochu jinak. Z naměřených výsledků vyplývá, že nejvyšší naměřené hodnoty byly u vzorku No.1-27-P. Vzorek dosáhl vysokých hodnot v parametrech RMS i v rozptylu složek F_x , F_z . Vůbec nejnižší vibrace z celého experimentu byly naměřeny u vzorku No.0 %-15-P. Je zajímavé, že vzorky se strukturou No.0 % dosahovaly menších vibrací než struktura dutá 100 %. Co se týče vzorků se strukturou No.2 a No.100 % je patrné, že tyto struktury nemají zásadní vliv na řezné síly.

- Pro frézování polotovaru po 3D tisku s různou vnitřní strukturou korozivzdorné oceli AISI 316L z hlediska zvolených řezných podmínek a řezného nástroje, doporučuji použít strukturu No.2 a No. 100 %. Vyhodnocené testy, co se týče těchto vzorků levé i pravé strany dosáhly tyto vzorky nejvíce stabilních hodnot.
- Pro frézování polotovaru po 3D tisku s různou vnitřní strukturou korozivzdorné oceli AISI 316L nedoporučuji volit strukturu No.1. Vyhodnocené testy ukazují, že tato struktura zobrazuje vysoké vibrace.
- Dále doporučuji použít vyšší řeznou rychlost. Ze zpracování rešerší ale i z teorie je zřejmé, že při zvyšování řezné rychlosti klesají hodnoty řezných sil.

Tabulka 4 - Doporučená struktura No. 2

Doporučená struktura a řezné síly			
No. 2			
Pravá strana		Levá strana	
F_x [N]	51	F_x [N]	52,1
F_y [N]	39,1	F_y [N]	32,3
F_z [N]	16,7	F_z [N]	19,4
F [N]	66,4	F [N]	64,3

Tabulka 5 - Doporučená struktura No. 100 %

Doporučená struktura a řezné síly			
No. 100 %			
Pravá strana		Levá strana	
F_x [N]	52,8	F_x [N]	48,7
F_y [N]	42	F_y [N]	32,7
F_z [N]	17,3	F_z [N]	19,6
F [N]	69,7	F [N]	61,8

Závěr

Diplomová práce se zabývala analýzou silového zatížení při frézování polotovaru z nerezové oceli 316L po 3D tisku technologií SLM. Cílem teoretické části byla zkoumána analýza sil při frézování. Úkolem praktické části bylo frézování oceli a pomocí dynamometru stanovit řezné síly a vygenerovat výslednici sil na vzorcích s různou strukturou, aby bylo možné zajistit jaká struktura má vliv na obrábění. Jistým rozšířením diplomové práce by mohlo být i zkoumání sil vzorků po tepelném zpracování nebo frézováním nesouslednou metodou.

V úvodní části se diplomová práce zabývala teoretickým rozborem sil během frézování. V kapitole zde byla popsána měrná řezná síla a řezné síly při válcovém frézování. Dále byly zkoumány vlivy, které ovlivňují nejvíce řezné síly. Na závěr teoretické části byly popsány metody měření silových poměrů.

Praktická část se ve svém úvodu zabývala výrobou zkušebních vzorků pro testování řezných sil. Následoval popis výrobního zařízení Renishaw AM 400, kde byly uvedeny jeho základní vlastnosti a technické parametry a metoda tisku SLM spolu s parametry tisku zkušebních vzorků. Dále zde bylo popsáno obráběcí centrum DMG MORI DMU50, na kterém se vzorky frézovaly. Práce pokračovala popisem korozivzdorné oceli 316L a řezného nástroje. Další podkapitola se věnovala popisu řezných podmínek. Dále je popsáno zapojení dynamometru KISTLER 9129AA a jeho nejdůležitějších komponentů. Dále bylo zpracováno označení vzorků a schéma celého experimentu pro lepší přehled.

Experimentem bylo frézování vzorků s různou vnitřní strukturou. Před každým měřením byla zapnuta měřicí aparatura a po frézování bylo měření zastaveno. Celý proces se opakoval u každého vzorku. Pomocí softwaru DynoWare byly zaznamenány jednotlivé složky síly. Během obrábění byly zaznamenány hodnoty ve třech různých směrech. Ve směru F_x , F_y , F_z . Tato data dále byla zpracována a vyhodnocena. Pro každý vzorek byl zkoumán rozkmit v ose x, y, z a hodnoty RMS. Následně byla vygenerována výsledná síla F pro všechny zkušební vzorky. Hodnoty pro lepší přehlednosti byly vloženy do tabulek a grafů a jednotlivě rozebrány.

Provedlo se zhodnocení, diskuze a porovnání. Vibrace se u každé struktury projevovaly trochu jinak. Při frézování docházelo k postupně měnící se tuhosti s postupným odebíráním materiálu. Tuhost se zmenšovala a tím se frézovaná součást stala více náchylnou na vznik samobuzeného chvění. Chvění způsobovalo nedodržení rozměrů obrobku a docházelo k průhybu. Největší průhyb byl vypočítán u struktury No.0 % a to 0,01627 mm. Vzhledem k tomu, že byla zvolena hloubka řezu 0,2 mm, tak docházelo k minimálnímu úběru materiálu. Bylo zjištěno, že pro nízké řezné síly je vhodné použít vzorek s vnitřní strukturou tvořenou diamanty. Tedy vzorek No.2. Jako vhodná volba se jevila i struktura plná No. 100 %, avšak hodnoty složek řezných sil

a rozptylu byly nepatrně větší. Co se týče struktury No.1 jeví se jako nejméně vhodná struktura. Průběh obrábění této struktury vykazoval velké vibrace i velikost síly řezání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. [I] *Nové směry v progresivním obrábění*[I]. Ostrava: Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3
- [2] HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění - 1.část*. Brno, 2003. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT -FSI, Ústav strojírenské technologie.
- [3] BUDAK, E. Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, 46(12-13), 1478-1488. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009. ISSN 08906955. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002622>
- [4] MACEK, K., ZUNA, P. a kol. *Strojírenské materiály. 1.* vydání Praha: ČVUT, 2003. 204 s. ISBN 80-01-02798-8.
- [5] STAHL, Jan-Eric. *Metal cutting: theories and models*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012. ISBN 978-91-637-1336-1.
- [6] SHAW, Milton. C. *Metal cutting principles 2nd*. New York: Oxford University Press, 2005. 651 s. ISBN 01-951-4206-3.
- [7] NĚMEC, M.,PROVAZNÍK, J. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [8] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění: řezné síly při obrábění*. Vyd. 1. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1993, 123 s. ISBN 80-708-3110-3.
- [9] Additive manufacturing systems: AM400. Renishaw [online]. ©2001-2020 [vid. 2020-04-5]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/am-400--35456>
- [10] Protolab - 3D tisk plastů a kovů, 3D skenování, podpora malých podniků. Protolab - 3D tisk plastů a kovů, 3D skenování, podpora malých podniků [online]. Copyright © [cit. 08.04.2020]. Dostupné z: <https://protolab.cz>
- [11] Italinox [online]. Copyright © Všechna práva vyhrazena Italinox [cit. 08.04.2020]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [12] Data sheets - *Additive manufacturing*. Object moved [online]. Copyright © [cit. 31.03.2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862>

- [13] DMU 50 - 5 Axis Milling by DMG MORI. *CNC obráběcí stroje, kovoobráběcí stroje DMG MORI* [online]. Copyright © 2020 DMG MORI. Všechna práva vyhrazena. [cit. 01.03.2020]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50-2nd-generation>
- [14] 1p341-1000-xa 1630. Document Moved [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 08.04.2020]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=1p341-1000-xa%201630>
- [15] StackPath. StackPath [online]. Dostupné z: <https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/article/16744806/nearinfrared-camera-monitors-selective-laser-melting-process>
- [16] Selective laser melting – HiSoUR – Hi So You Are. HiSoUR – Hi So You Are – Hisour – History+Tour. Virtual Tour, Artwork Exhibition, Discovery History, Global Cultural Online. [online]. Dostupné z: <https://www.hisour.com/selective-laser-melting-40644/>
- [17] TENDO hydro upínače. Winter-servis [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: http://www.winter-servis.cz/index.php?page=schunk/n_tendo
- [18] TENDO E compact. Schunk [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://schunk.com/us_en/homepage/tendo-e-compact/#c3237
- [19] KOCMAN, K a J PROKOP. *Výrobní technologie II*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. ISBN 80-214-2189-4.
- [20] Multicomponent Dynamometer: KISTLER type 9129 AA [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2009 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=109149&model=document>
- [21] Multichannel Charge Amplifier: KISTLER type 5070A [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2010 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=106944&model=document&callee=frontend>
- [22] DAQ-System for DynoWare: KISTLER Type 5697A [online]. Switzerland: KISTLER Group, 2010 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=111486&model=document>
- [23] Základy piezoelektriny pro aplikace. Crr.vutbr. [online]. 2011 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHY

Příloha A	Technické parametry 3D tiskárny Renishaw AM 400
Příloha B	Technické parametry obráběcího centra DMG DMU 50
Příloha C	Technické parametry dynamometru KISTLER 9129AA
Příloha D	Výrobní výkres: Vzorek plný
Příloha E	Výrobní výkres: Vzorek dutý
Příloha F	Tabulka naměřených složek sil a výslednice síly řezání

ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY

SOUBOR

Příloha G	Výpočetní a grafické soubory pro parametr RMS	<i>parametr RMS.xlsx</i>
Příloha H	Výpočetní a grafické soubory rozkladu složek sil	<i>rozklad složek sil.xlsx</i>
Příloha I	Výpočetní a grafické soubory posunutí	<i>predikce posunutí.xlsx</i>
Příloha J	Výpočetní a grafické soubory výslednice sil	<i>výslednice sil.xlsx</i>
Příloha K	Fotografie z experimentu	<i>experiment.rar</i>

AM 400 additive manufacturing system

System description

The Renishaw AM 400 is the latest development of the Renishaw AM platform and features an increase in laser power from 200 W to 400 W whilst still maintaining the same 70 µm spot size at the powder bed. It has been designed for users who require the flexibility to change between different materials, a range of accessories being available to minimise the risks of cross-contamination.

The AM 400 is capable of processing build files created for the standard AM 250 system without additional changes allowing an easier transition from AM 250 to AM 400. New build files will be required to fully exploit the additional laser power available on the AM 400.



System specification

Build area X × Y × Z	250 mm × 250 mm × 300 mm (9.8 mm × 9.8 mm × 12 mm)
Build volume X × Y × Z	248 mm × 248 mm × 285 mm (9.7 in × 9.7 in × 11 in)
Build rate*	Up to 20 cm ³ /hr (1.22 in ³ /hr)
Powder layer thickness	In the range of 20 µm to 100 µm (1 µin to 4 µin)
Laser power	400 W
Laser focus diameter	70 µm (3 µin)
Speed scanning	Up to 2 m/s (6.6 ft/s)
Speed positioning	7 m/s (23 ft/s)
External dimensions without accessories	853 mm × 1700 mm × 2115 mm (34 in × 67 in × 83 in)
Weight (gross/net)	1225 kg / 1100 kg (2700 lb / 2425 lb)
Running argon consumption after initial fill	< 50 L/hr (< 61 in ³ /hr)
Filling/purge argon consumption	600 L to 1500 L (21 ft ³ to 53 ft ³)
Power supply	220 V to 240 V, 16 A, 45 Hz to 60 Hz, single phase
Compressed air	Required
Materials	AlSi10Mg, CoCr, In625, In718, stainless steel 316L, Ti6Al4V†

* Build rate is dependent on part geometry and material

† Material list will be available on initial release of AM 400 for full 400 W laser parameters, all other material lists will follow after initial release

Příloha B Technické parametry obráběcího centra DMG DMU 50

DMU 50

Technical data

		DMU 50
Working area		
Travel X / Y / Z	mm in	500 / 450 / 400 19.7 / 17.7 / 15.7
Main drive [standard]		
Speed range	rpm	20 – 14.000
Drive power [100 / 40 % DC]	kW hp	14,5 / 20,3 19.4 / 27.2
Torque [40 % DC]	Nm ft-lbs	121 89.2
Main drive [optional]		
Speed range	rpm	20 – 18.000
Drive power [100 / 40 % DC]	kW hp	25 / 35 33.5 / 46.9
Torque [40 % DC]	Nm ft-lbs	130 95.9
Feed		
Rapid traverse X / Y / Z	m/min ipm	30 1,181
Maximum thrust force X / Y / Z	kN lbf	4,8 1,079
Fixed table		
Clamping area	mm in	700 x 500 27.6 x 19.7
Maximum load	kg lbs	500 1,102
Integrated swivelling rotary table*		
Clamping area	mm in	ø 630 x 500 ø 24.8 x 19.7
Maximum load	kg lbs	300 661
Swivel range	Degrees	-5 / +110
Optional pick-up tool change system		
Capacity	pockets	16
Tool weight	kg lbs	6 13.2
Maximum tool length	mm in	300 11.8
Maximum tool diameter	mm in	80 / 130 3.1 / 5.1
Optional tool change system with chain and double gripper		
Capacity	pockets	30 / 60
Tool weight	kg lbs	6 13.2
Maximum tool length	mm in	300 11.8
Maximum tool diameter	mm in	80 / 130 3.1 / 5.1
Machine weight / connected values		
Weight	kg lbs	4,480 9,880
Power	kW hp	21 28.2
Maximum current rating	A	31
Options		
Swivelling rotary table for 5-axis simultaneous machining; laser tool measurement; chip conveyor; tool magazine with 16 / 30 / 60 pockets; linear scales in X / Y / Z; oil mist filter; air blast / coolant switch; air blast through the spindle centre; spray gun; chip conveyor; internal coolant supply at up to 40 bar 580 psi.		
Control		
ERGOline® Control with a 21.5" multi-touch screen, CELOS® and SIEMENS 840D solutionline		•
ERGOline® Control with a 19.5" screen and HEIDENHAIN iTNC 530		•

* Optional

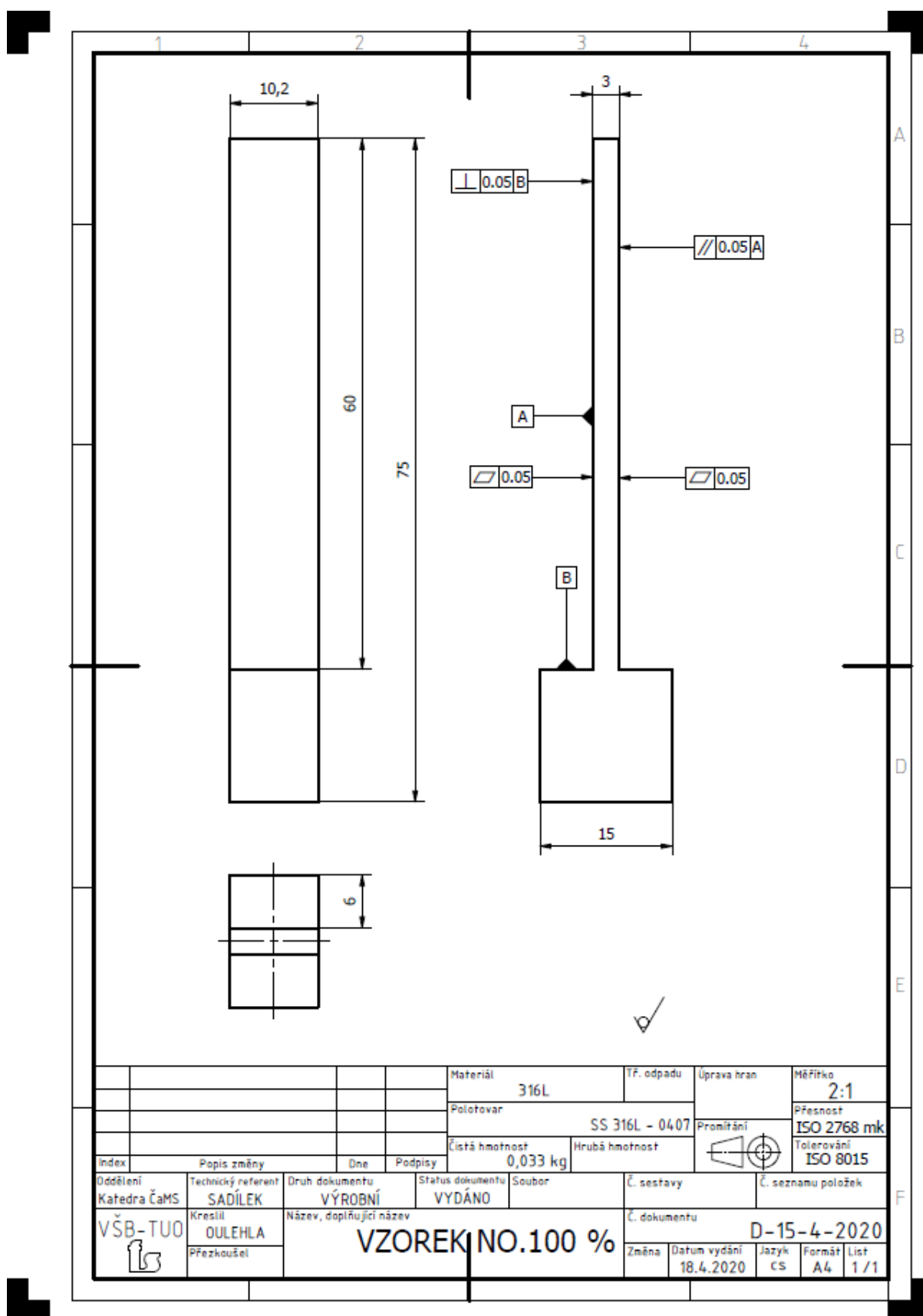
Příloha C Technické parametry dynamometru KISTLER 9129AA



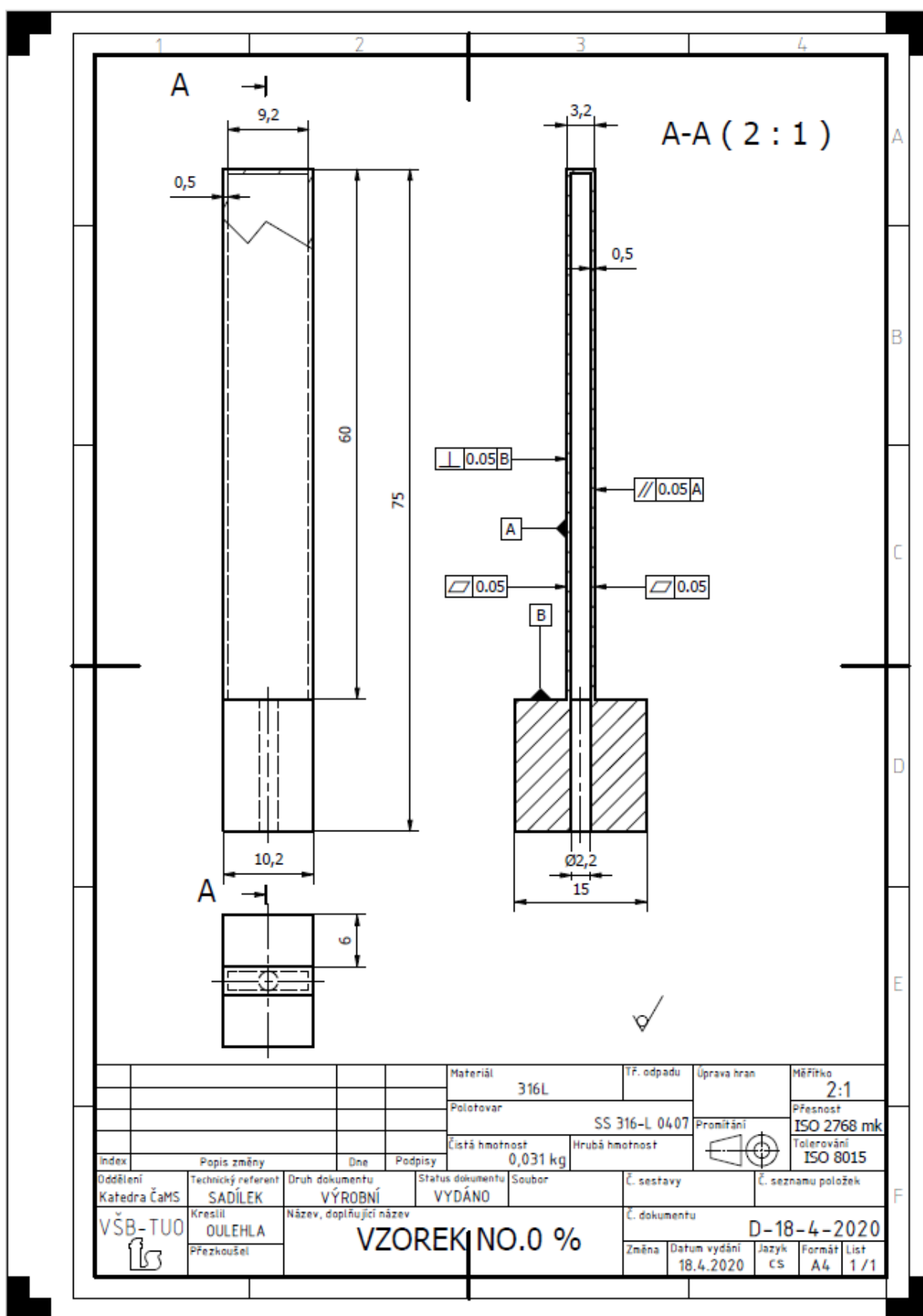
Technical data

Max. permitted measuring range (Force application point at cover plate surface)	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	kN N·m	-10 ... 10 -500 ... 500
Calibrated measuring range 100 %	F_x, F_y, F_z	kN	0 ... 10
Calibrated partial meas. range 10 %	F_x, F_y, F_z	kN	0 ... 1
Calibrated partial meas. range 1 %	F_x, F_y, F_z	kN	0 ... 0,1
Overload	F_x, F_y, F_z	%	20
Threshold		N	<0,01
Sensitivity (rated)	F_x F_y F_z	pc/N pc/N pc/N	≈-8,1 ≈-4,1 ≈-8,1
Linearity, all ranges	F_x, F_y, F_z	±%/FSO	≤±0,3
Hysteresis, all ranges	F_x, F_y, F_z	%/FSO	≤0,3
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	≤±2
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	≤±2
Rigidity	c_x, c_z	N/μm	≈1 000
	c_y	N/μm	≈4 000
Natural frequency (Type 9129AA mounted on rigid base)	$f_n(x)$	kHz	≈3,5
	$f_n(y)$	kHz	≈4,5
	$f_n(z)$	kHz	≈3,5
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈180
Isolation resistance		Ω	>10 ¹³
Ground isolation		Ω	>10 ⁸
Degree of protection EN60529			IP67
Weight	Dynamometer	kg	3,2
	Cover plate	kg	2,0
Mounting surface		mm	90x105
Connection		Fischer flange 9 pin neg.	

Příloha D Výrobní výkres: Vzorek plný



Příloha E Výrobní výkres: Vzorek dutý



Příloha F Tabulka naměřených složek sil a výslednice síly řezání

Veličina	jednotka	15.0 %-P	15.0 %-L	2.No.1-P	2.No.1-L	27.No.2-P	27.No.2-L	39.100 %-P	39.100 %-L
F _x	[N]	40.2	49	34	68.8	51	52.1	52.8	48.7
F _x max	[N]	62	62	46.5	100	73	74.5	80.4	64.4
F _x min	[N]	3	5	1.5	6.3	9.6	2.6	5.8	6.9
Rozkmit F _x	[N]	59	57	45	93.7	63.4	71.9	74.6	57.5
Rozkmit F _x	[%]	147	116	132	136	124	138	141	118
F _y	[N]	29.8	36.5	25	42.3	39.1	32.3	42	32.7
F _y max	[N]	46.8	46	33.6	63.1	55.7	46.3	64.8	42
F _y min	[N]	2.6	6.5	1.7	7.6	8	4.6	4	5.9
Rozkmit F _y	[N]	44.2	39.5	31.9	55.5	47.7	41.7	60.8	36.1
Rozkmit F _y	[%]	148	108	128	134	122	129	144	110
F _z	[N]	15.1	19	10.5	27.9	16.7	19.4	17.3	19.6
F _z max	[N]	23.3	24	14.4	40.6	28.5	27.7	22	26
F _z min	[N]	1.5	3.3	2	3	3.7	2.3	7	3.5
Rozkmit F _z	[N]	21.8	20.7	12.4	37.6	24.8	25.4	15	22.5
Rozkmit F _z	[%]	142	108	114	135	145	131	87	113
F _v	[N]	52.3	64.0	43.5	85.4	66.4	64.3	69.7	61.8
F _v	[%]	10	13	8	17	13	13	14	12